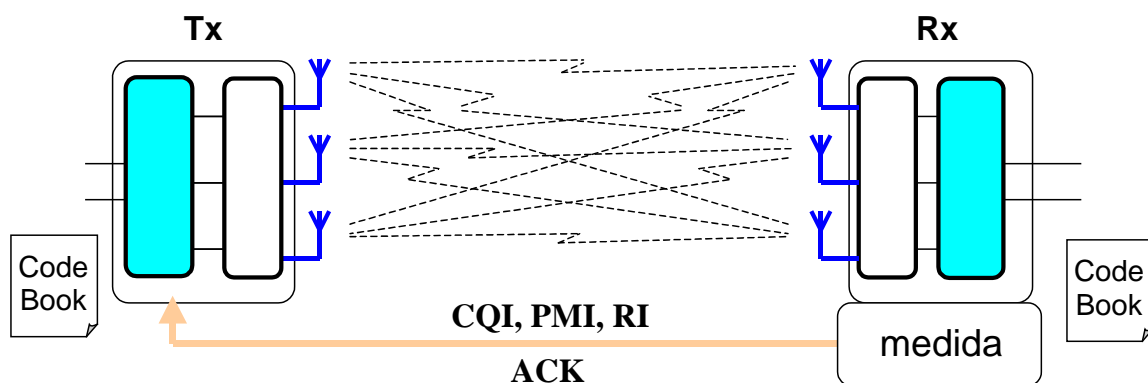


Técnicas de tratamiento de señal y comunicaciones

5 Adaptación de enlace



Tema 6 Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Probabilidad de error - Inversión de la fórmula aproximada
SNR gap

Adaptación de la tasa de codificación

Concepto

Aumento de la tasa de codificación: perforado

Reducción de la tasa de codificación: repetición

Adaptación conjunta de la modulación y la codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación

Bit/simb entero par

Bit/simb valores no enteros

Comparación con entrelazado sin adaptación

Ejemplos ADSL, LTE

Adaptación MIMO

STBC/SFBC

Conformación de haz (*beamforming*)

Multiplexación espacial (MIMO mux)

Libros de códigos

Retransmisión

ARQ y H-ARQ

Combinación de bloques

Redundancia incremental

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

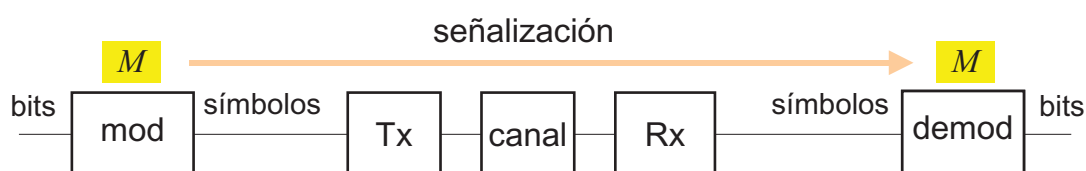
Adaptación de la tasa de codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación

Adaptación MIMO

Retransmisión

Sistema de modulación configurable



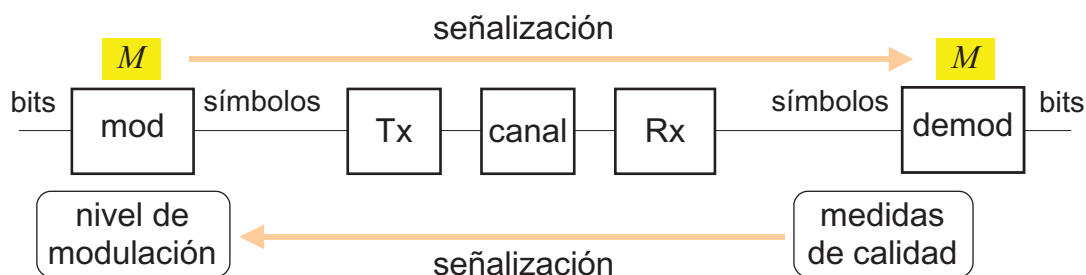
- Transmisor y receptor pueden trabajar con diferentes modulaciones
- Transmisor debe señalizar el nivel de modulación empleado
- Canal de señalización multiplexado con los datos

Ejemplos:

	constelaciones	señalización
TDT	16-QAM a 256-QAM	periódicamente
WiFi	BPSK, 4-QAM a 64-QAM	al comienzo de paquete

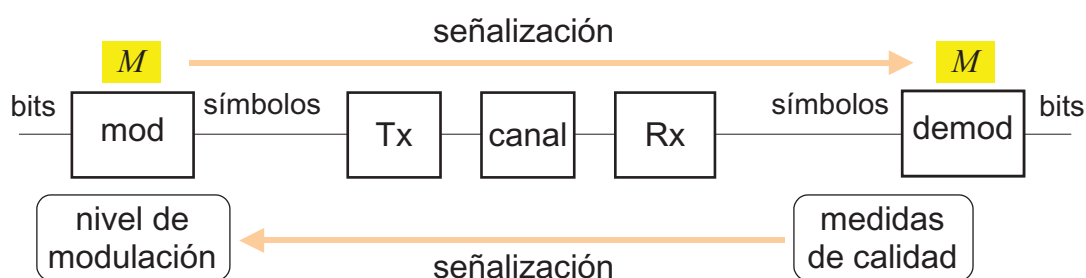
- Señalización usa una constelación fija sencilla (BPSK o 4-QAM)

Sistema de modulación adaptativa



- Receptor realiza medidas de calidad de la señal recibida y ... puede sugerir la modulación adecuada
- Requiere un canal de señalización en sentido inverso
- Es el transmisor el que decide la modulación (y la señaliza al receptor)
- Es útil con canales de calidad desconocida o cambiante en el tiempo

Sistema de modulación adaptativa



- Criterio de adaptación típico: no superar una BER objetivo
- Se puede hacer midiendo la BER o la SNR en el receptor

Canal gaussiano. M-QAM. Probabilidad de error

$$P_s = \alpha_M Q\left(\sqrt{\beta_M \cdot \gamma}\right)$$

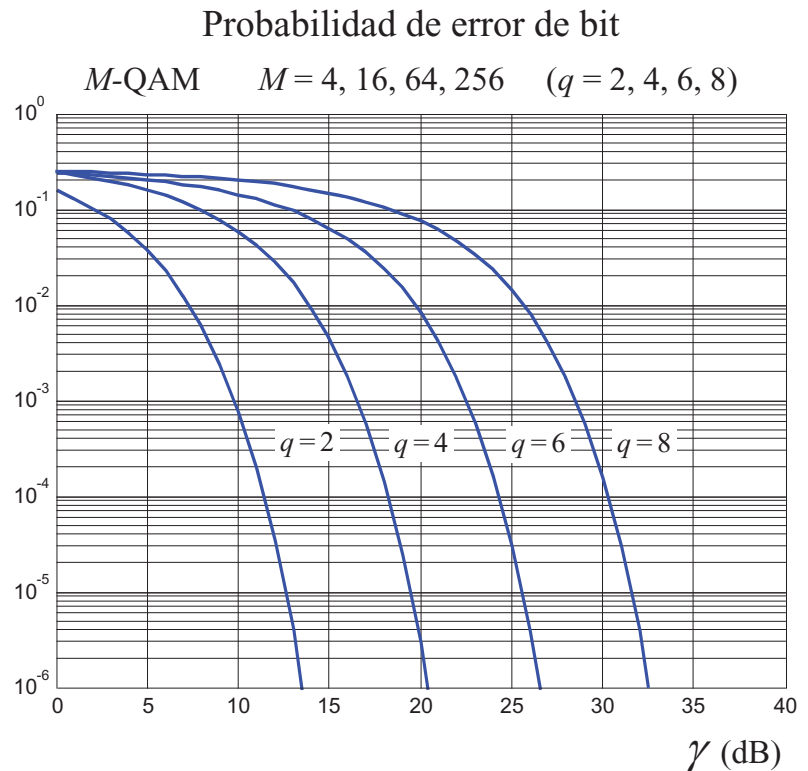
$$\alpha_M = 4 - 4/\sqrt{M}$$

$$\beta_M = 3/(M-1)$$

$$P_b = \frac{1}{\log_2 M} \cdot P_s(\gamma)$$

nivel de modulación:

$$q = \log_2 M$$



Canal gaussiano. M-QAM. Adaptación de la modulación

Dada una P_b objetivo, ...

si se conoce γ ...

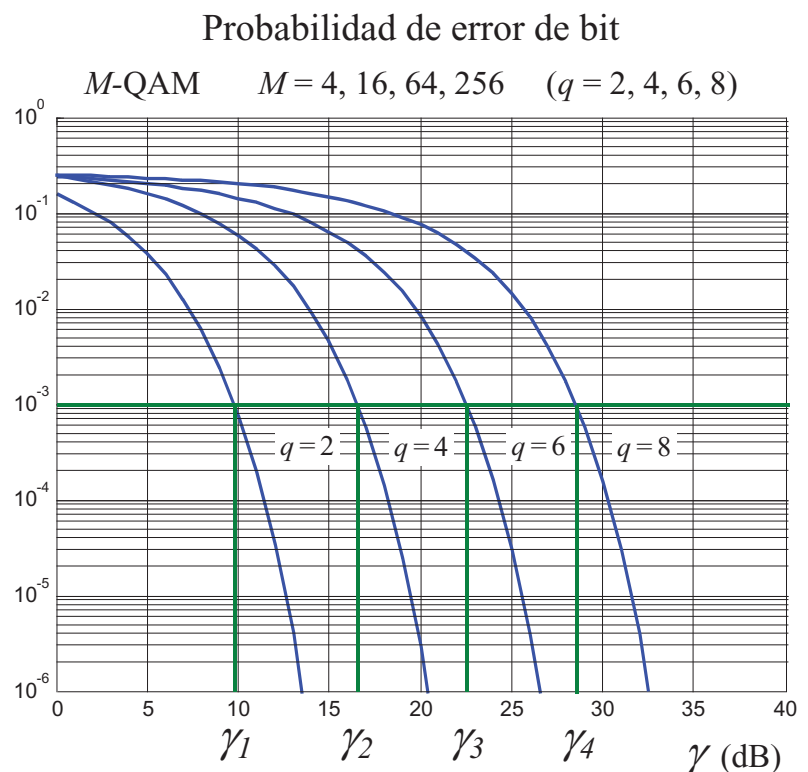
Se puede decidir q

para no superar la P_b objetivo

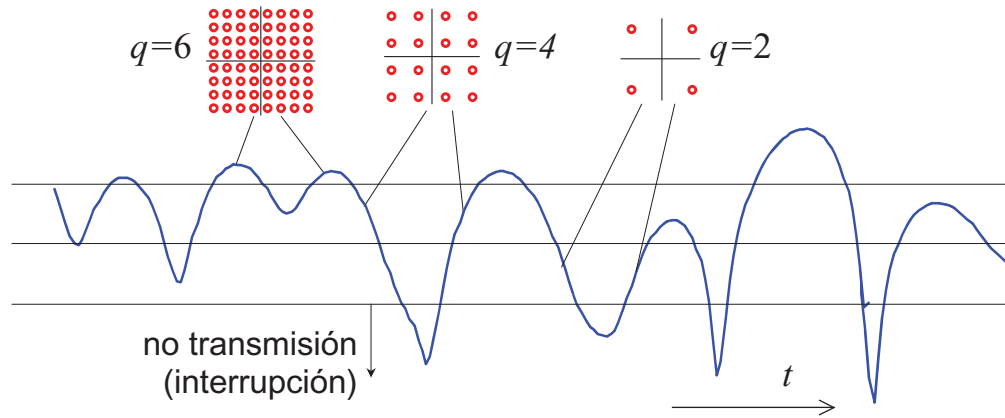
Ej.: P_b objetivo = 10^{-3}

4 regiones:

q	
$\gamma < \gamma_1$	0 no Tx
$\gamma_1 < \gamma < \gamma_2$	2 4-QAM
$\gamma_2 < \gamma < \gamma_3$	4 16-QAM
$\gamma_3 < \gamma < \gamma_4$	6 64-QAM
$\gamma_4 < \gamma$	8 256-QAM

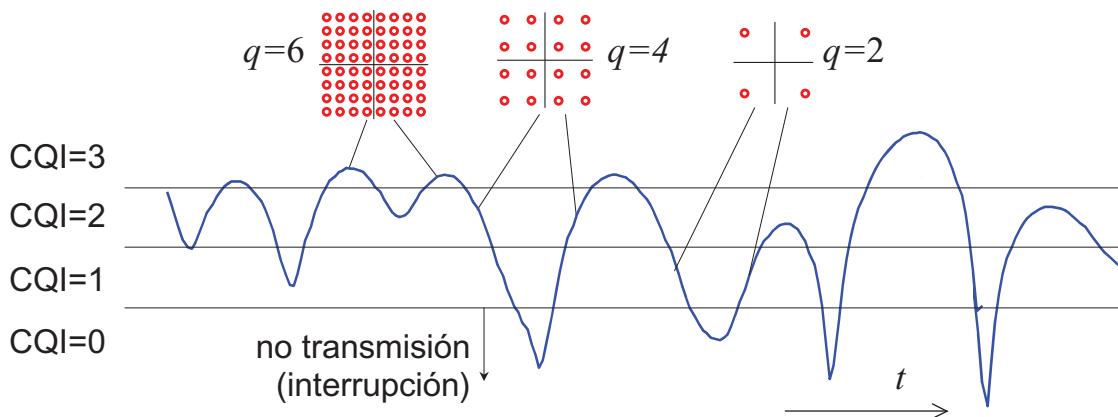


Canal Rayleigh de variación lenta. Modulación adaptativa



- Se modifica la modulación para no superar una P_b objetivo
- El receptor mide la SNR y la indica al transmisor (señalización)
- El transmisor ajusta el nivel de modulación q
 - Hay interrupciones de transmisión (cuando SNR demasiado baja)

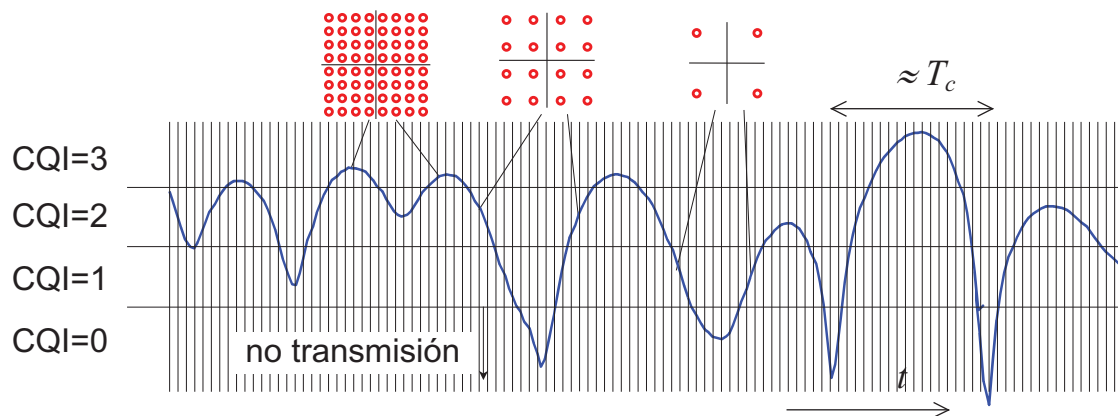
Canal Rayleigh de variación lenta. Modulación adaptativa



- Para reducir la señalización el receptor envía sólo una indicación de la región de SNR: **CQI: Channel Quality Indicator:**

0	$\gamma < \gamma_1$
1	$\gamma_1 < \gamma < \gamma_2$
2	$\gamma_2 < \gamma < \gamma_3$
3	$\gamma_3 < \gamma$

Canal Rayleigh de variación lenta. Modulación adaptativa

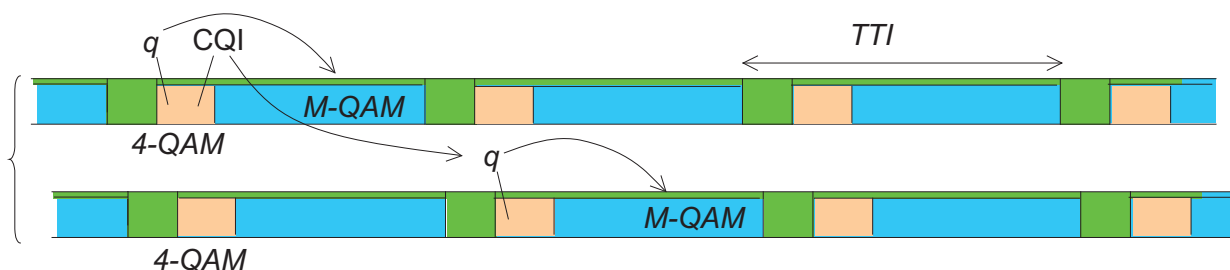


- La transmisión se hace en **bloques de símbolos**
- Bloques de duración $< T_c/20$ (ganancia del canal varía poco en el bloque)
- Ej.: $F_c=1800$ MHz, $v=5$ km/h (peatón) $T_c = 120$ ms
- Con variación rápida no se puede hacer modulación adaptativa

Canal Rayleigh de variación lenta. Modulación adaptativa

Ejemplo. Transmisión continua bidireccional

- La transmisión se divide en **Intervalos de Transmisión de Bloque**
TTI: *Transmission Time Interval*
- Al comienzo de cada bloque va una señalización en 4-QAM indicando:
 - el nivel de modulación q empleado en el resto del bloque
 - el CQI medido para la transmisión en sentido contrario
- Cada transmisor puede usar los CQI que recibe para cambiar su modulación
 - Pero sólo puede hacerlo en un siguiente bloque, indicándolo al principio



Probabilidad de error - QAM - Fórmula aproximada

$$P_s = \alpha_M Q\left(\sqrt{\beta_M \cdot \gamma}\right)$$

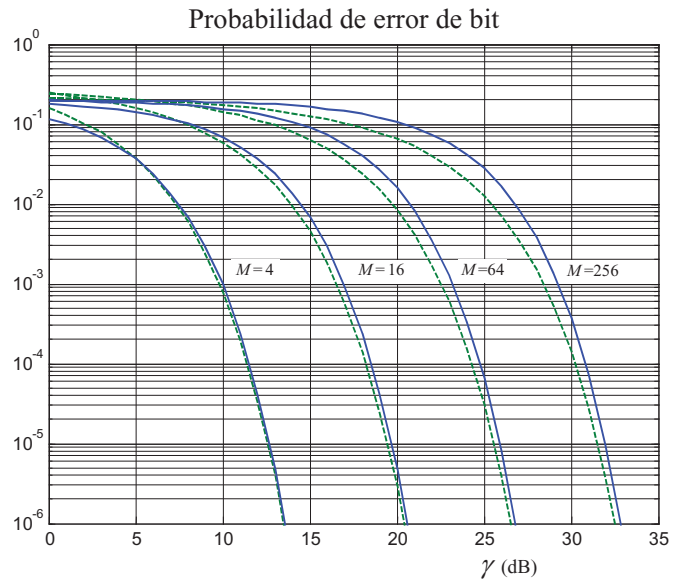
$$\alpha_M = 4 - 4/\sqrt{M}$$

$$\beta_M = 3/(M-1)$$

$$P_b = \frac{1}{\log_2 M} \cdot P_s(\gamma) =$$

$$= \frac{\alpha_M}{\log_2 M} \cdot Q\left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \cdot \gamma}\right)$$

$$P_b \approx \frac{1}{5} \exp\left(\frac{-1,6\gamma}{M-1}\right)$$



- Fórmula aproximada: error < 1dB para $P_b < 10^{-3}$

Probabilidad de error - Inversión de la fórmula aproximada

$$P_b \approx \frac{1}{5} \exp\left(\frac{-1,6\gamma}{M-1}\right)$$

Inversión de la fórmula

- Cálculo de M en función de γ
- Depende de P_b objetivo

Despejando M :

$$\ln(5P_b) = \frac{-1,6\gamma}{M-1} \quad \rightarrow \quad M-1 = \frac{-1,6\gamma}{\ln(5P_b)} \quad \rightarrow \quad M = 1 + \frac{-1,6\gamma}{\ln(5P_b)}$$

$$M = 1 + \frac{\gamma}{\Gamma(P_b)} \quad \text{con} \quad \Gamma(P_b) = \frac{-\ln 5P_b}{1,6}$$

$$b = \log_2 M = \log_2 \left(1 + \frac{\gamma}{\Gamma(P_b)}\right)$$

Probabilidad de error - Inversión de la fórmula aproximada

Comparación con capacidad

Capacidad
(Shannon)

$$C = \log_2(1 + \gamma)$$

Tasa binaria M-QAM
con restricción de P_b

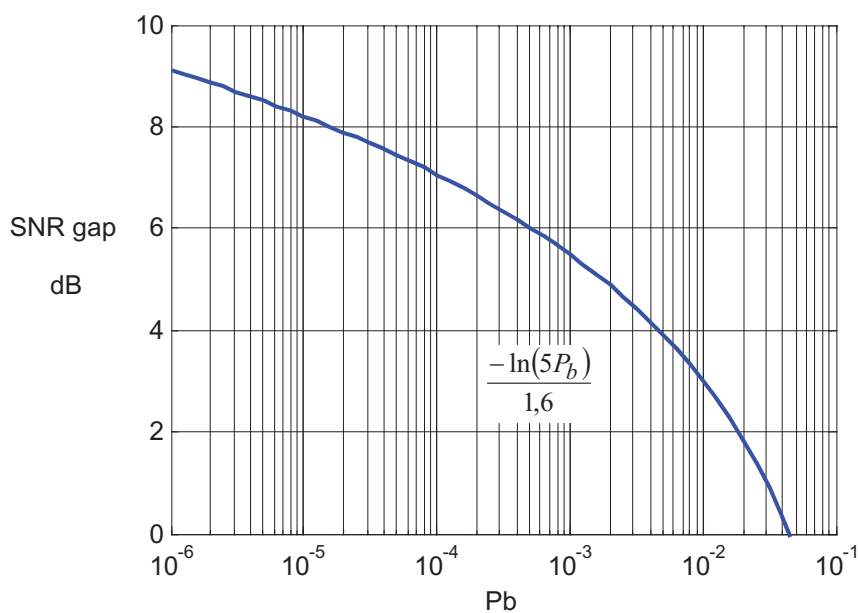
$$b = \log_2\left(1 + \frac{\gamma}{\Gamma(P_b)}\right)$$

$$\Gamma(P_b) = \frac{-\ln(5P_b)}{1,6}$$

diferencia respecto a capacidad (**SNR gap**)

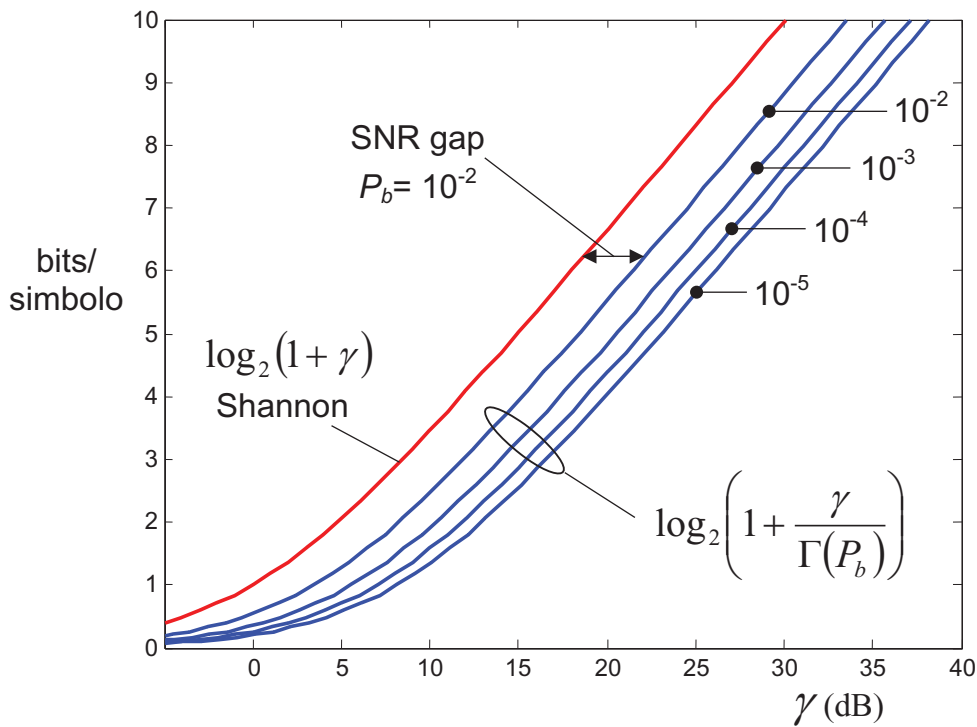
mayor para mejor P_b

Probabilidad de error - SNR gap



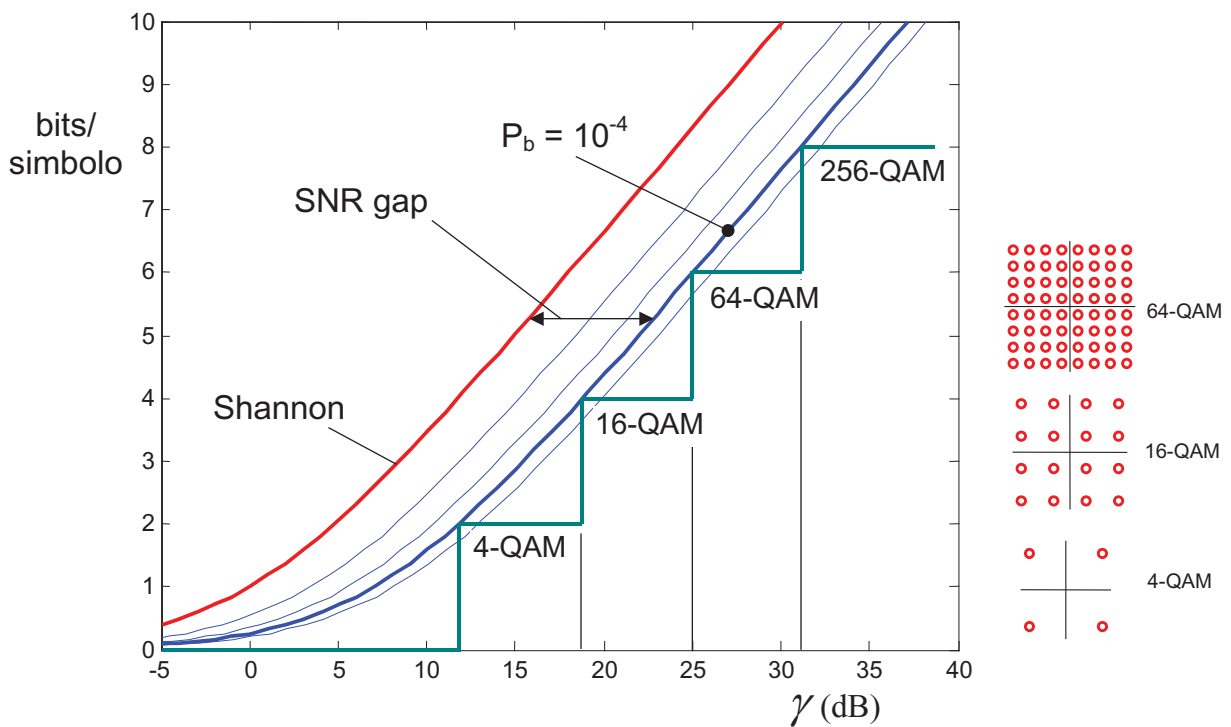
- **SNR gap** mayor si se requiere mejor P_b

Probabilidad de error - Inversión de la fórmula aproximada



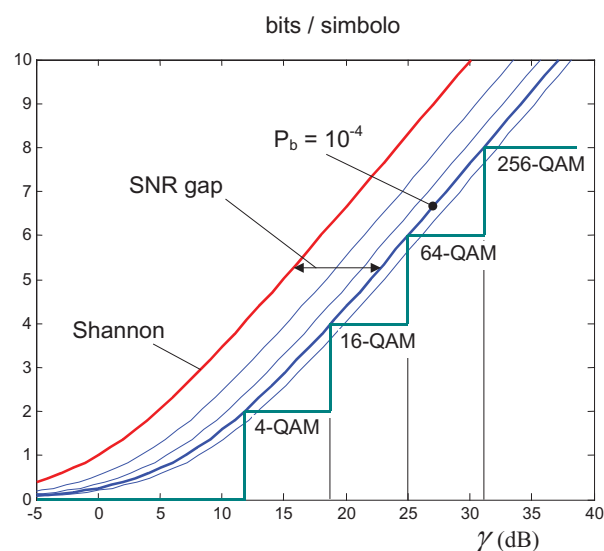
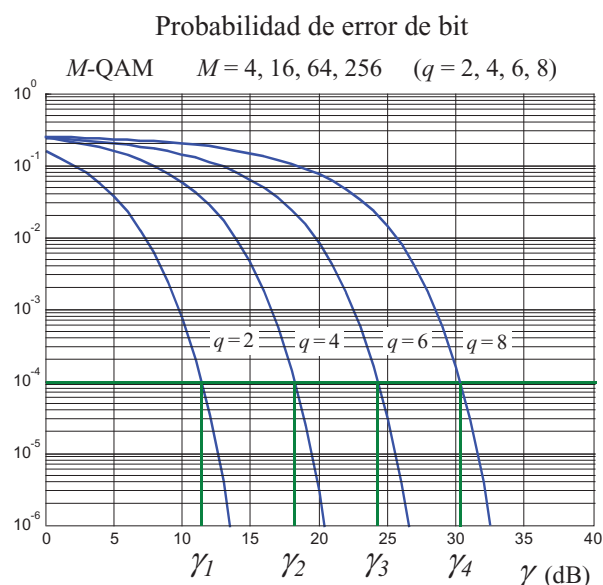
- **SNR gap** mayor si se requiere mejor P_b

Inversión de la fórmula de la $Prob_{err}$ - Cuantificación (entero par)



- Para constelaciones cuadradas con número entero de bits en cada dimensión

Inversión de la fórmula de la Prob_{err} - Cuantificación (entero par)



$$\Gamma(P_b) = \frac{-\ln(5P_b)}{1,6}$$

Inversión de la fórmula de la Prob_{err} - Cuantificación

Cálculo de los umbrales entre regiones

$$M = 1 + \frac{\gamma}{\Gamma(P_b)} \quad \text{con} \quad \Gamma(P_b) = \frac{-\ln 5P_b}{1,6}$$

Despejando γ

$$\gamma = (M - 1) \cdot \Gamma(P_b)$$

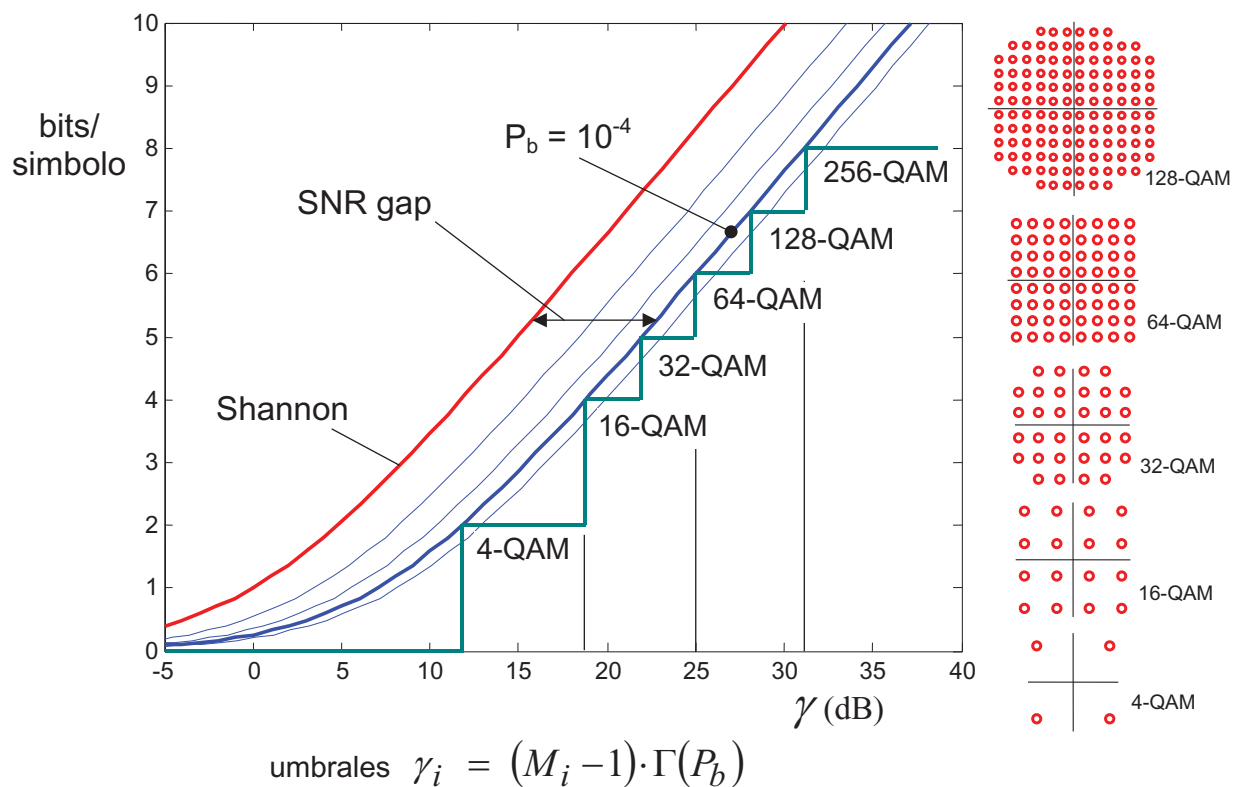
Con una modulación M_i ...

... para asegurar una probabilidad de error $< P_b$

... la SNR debe estar por encima de este umbral

$$\gamma_i = (M_i - 1) \cdot \Gamma(P_b)$$

Inversión de la fórmula de la Prob_{err} - Cuantificación (entero)



Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación

Adaptación MIMO

Retransmisión

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Concepto

Aumento de la tasa de codificación: perforado

Reducción de la tasa de codificación: repetición

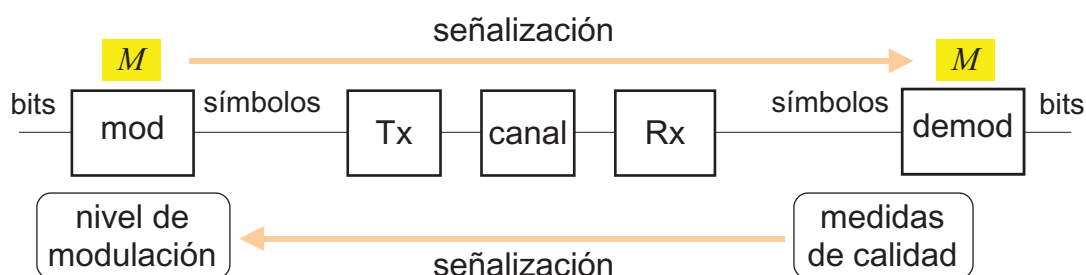
Adaptación conjunta de la modulación y la codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación

Adaptación MIMO

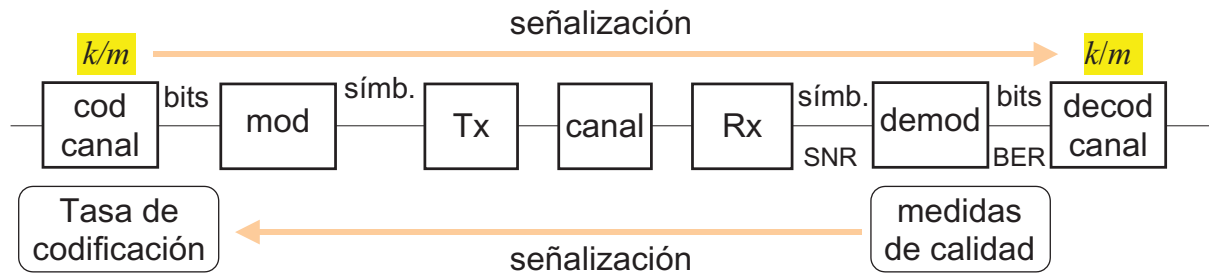
Retransmisión

Sistema de modulación adaptativa



- Receptor realiza medidas de calidad de la señal recibida y ... puede sugerir la modulación adecuada
- Al subir la SNR se reduce la BER a la salida ...
... se puede subir el nivel de modulación
- Criterio de adaptación típico: no superar una BER objetivo a la salida
- Requiere un canal de señalización en sentido inverso

Sistema de codificación de canal adaptativa



- Receptor realiza medidas de calidad de la señal recibida y ... puede sugerir la codificación de canal adecuada
- Al subir la SNR se reduce la BER a la salida del demodulador ...
... se puede subir la tasa de codificación
(menos redundancia, menos corrección de errores, más velocidad)
- Requiere canales de señalización directo e inverso
- Es el transmisor el que decide la codificación (y la señaliza al receptor)

Adaptación de la tasa de codificación

Dada una P_b objetivo, ...
si se conoce SNR ...

... se puede decidir k/m
para no superar la P_b objetivo

Ej.: P_b objetivo = 10^{-3}

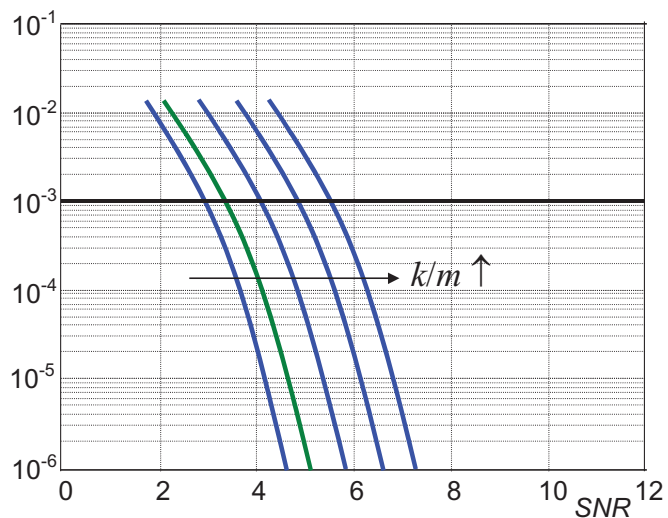
al subir SNR

se producen menos errores de demodulación

se puede subir la tasa de codificación

(max: $k/m = 1$)

Probabilidad de error de bit



Pero...

¿Cómo construir un codificador y decodificador de tasa adaptable?

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Concepto

Aumento de la tasa de codificación: perforado

Reducción de la tasa de codificación: repetición

Adaptación conjunta de la modulación y la codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación

Adaptación MIMO

Retransmisión

Codificación convolucional. Perforado

- La **perforación** reduce la redundancia y la capacidad de corrección de errores ...
... a cambio de augmentar la velocidad binaria transmitida

Ejemplo

- Codificador de tasa 1/3 periodo de perforación $p = 12$ bits

patrón	bits 1 a 12												(q) bits perforados	(p-q) bits transmitidos	tasa de codificación	
1	d			d			d			d			8	4	1	1,00
2	d			d			d			d			7	5	4/5	0,80
3	d			d			d			d			6	6	2/3	0,67
4	d			d			d			d			5	7	4/7	0,57
5	d			d			d			d			4	8	1/2	0,50
6	d			d			d			d			3	9	4/9	0,44
7	d			d			d			d			2	10	2/5	0,40
8	d			d			d			d			1	11	4/11	0,36
9	d			d			d			d			0	12	1/3	0,33

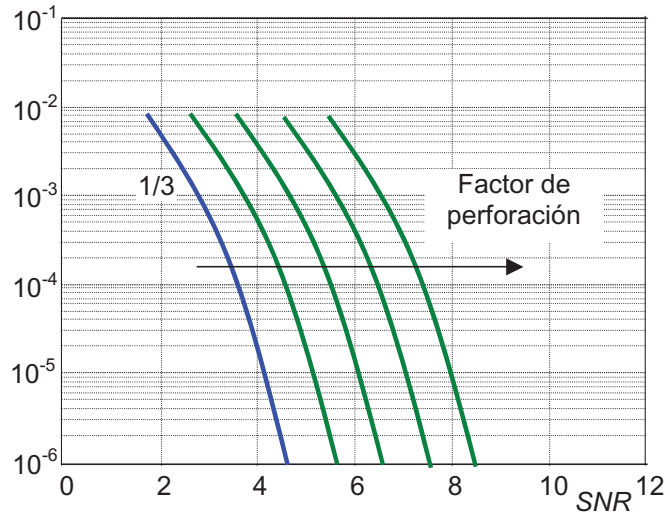
□ bits perforados □ d bits del mensaje

Adaptación de la tasa de codificación

¿Cómo construir un codificador y decodificador de tasa adaptable?

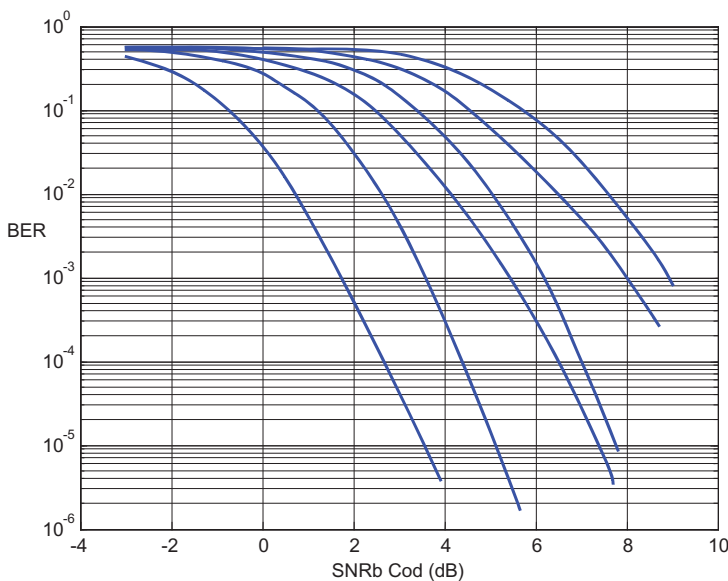
- Usar un codificador fijo simple de tasa 1/3 ó 1/2
- Aumentar la tasa mediante **perforación y decodificación de secuencias**

<i>tasa de codificación</i>	
1	1,00
4/5	0,80
2/3	0,67
4/7	0,57
1/2	0,50
4/9	0,44
2/5	0,40
4/11	0,36
1/3	0,33



Adaptación de la tasa de codificación

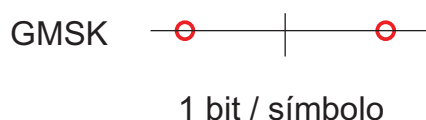
- Codificador de tasa ajustable
- Práctica 43



perforado		tasa cod.	
q/p	$p/(p-q)$	$p/(p-q) \times 1/2$	
0/1	1/1	1/2	0,50
1/4	4/3	2/3	0,67
2/6	6/4	3/4	0,75
4/10	10/6	5/6	0,83
7/16	16/9	8/9	0,89
15/32	32/17	16/17	0,94

Adaptación de la tasa de codificación

Ejemplo 1 GPRS



<i>Esquema de codificación</i>	<i>kbit/s</i>	
GMSK	0,53	8,8
	0,66	11,2
	0,85	14,8
	1	17,6

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Concepto

Aumento de la tasa de codificación: perforado

Reducción de la tasa de codificación: repetición

Adaptación conjunta de la modulación y la codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación

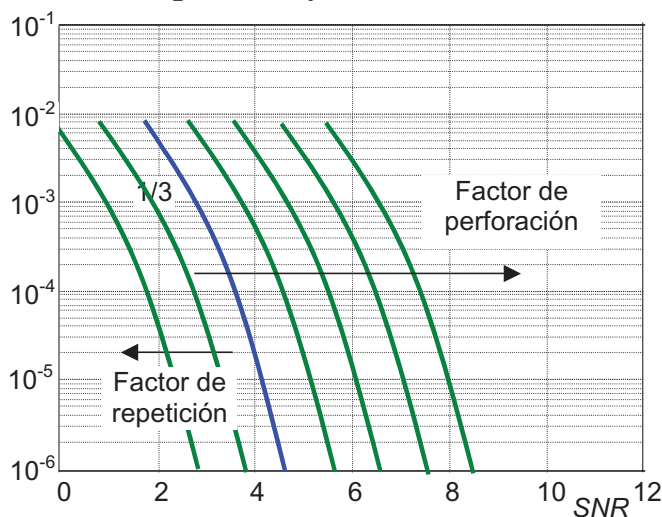
Adaptación MIMO

Retransmisión

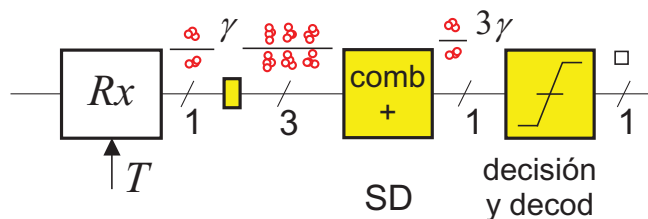
Adaptación de la tasa de codificación

¿Cómo construir un codificador y decodificador de tasa adaptable?

- Usar un codificador fijo simple de tasa 1/3 ó 1/2
- Aumentar la tasa mediante perforación y decodificación de secuencias
- Reducir la tasa mediante **repetición y combinación**



Codificación de canal. Decisión dura y blanda



Códigos de repetición con decisión blanda (combinación antes de decidir)

- La **repetición** aumenta la redundancia y la capacidad de corrección de errores ...
... a cambio de reducir la velocidad binaria transmitida
- factor de repetición = mejora de la SNR = pérdida de velocidad

factor de repetición	mejora de la SNR	tasa binaria
× 2	3 dB	0,5
× 3	4,7 dB	0,33
× 4	6 dB	0,25
× 5	7 dB	0,25

Adaptación de la tasa de codificación

Ejemplo 2 UMTS – LTE

Esquema de codificación	Modulación 2 bit/simb	Tasa de codificación k/m	ajuste tasa	$10\log(\text{rep})$	bit/simb (sin codificar)
1	4-QAM	0.076	rep \times 4,34	6,3dB	0,152
2		0.12	rep \times 2,75	4,4 dB	0,24
3		0.19	rep \times 1,73	2,3 dB	0,38
4		0.33	tasa madre		0,66
5		0.44	perf 25%		0,88
6		0.59	perf 44%		1,18

- Código madre de tasa 1/3
- Se pueden obtener tasas de codificación inferiores a 1/3 con repetición
- Para transmisión a baja velocidad por canales de muy baja SNR
- Pasos de \sim 2 dB

Adaptación de la tasa de codificación

Ejemplo 2 UMTS – LTE

Esquema de codificación	Modulación 2 bit/simb	Tasa de codificación k/m	ajuste tasa	$10\log(\text{rep})$	bit/simb (sin codificar)
2	4-QAM	0.12	rep \times 2,75	4,4 dB	0,24

secuencia codificada a tasa madre 1/3



secuencia transmitida: repetición \times 2,75 tasa 0,12



combinación en recepción



+



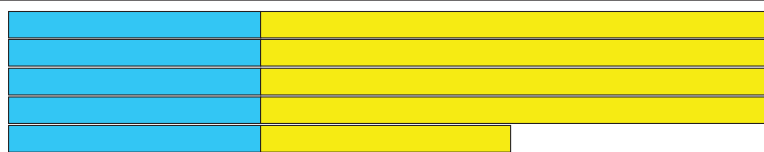




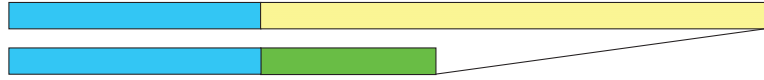
+



- El receptor combina los bit repetidos antes de pasar al decodificador de secuencias

Adaptación de la tasa de codificación

Ejemplo 2 UMTS – LTE

	repetición × 4,34	k/m 0,076
	repetición × 2,75	0,12
	repetición × 1,73	0,19
	código madre 1/3	0,33
	perforación 25%	0,44
	perforación 44%	0,59

- El receptor combina los bit repetidos antes de pasar al decodificador de secuencias

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Concepto

Aumento de la tasa de codificación: perforado

Reducción de la tasa de codificación: repetición

Adaptación conjunta de la modulación y la codificación

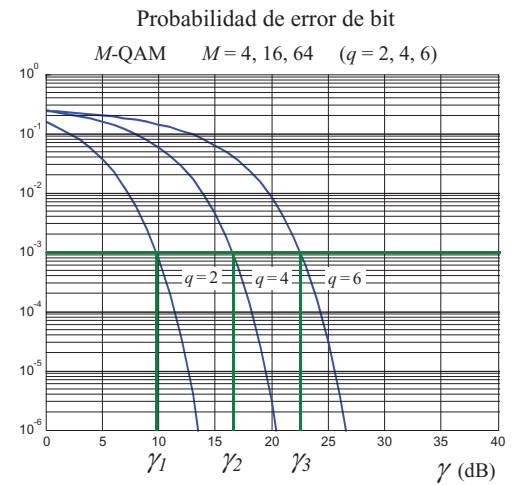
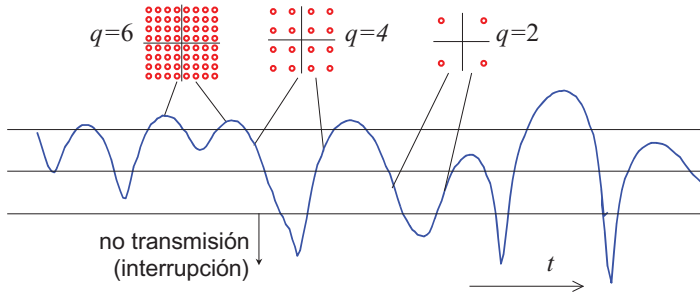
Prestaciones de sistemas con adaptación

Adaptación MIMO

Retransmisión

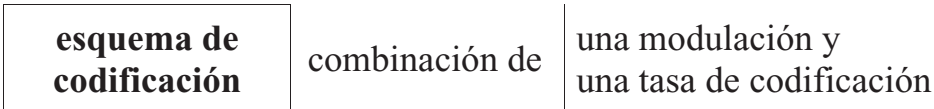
Modulación adaptativa

- Usando M -QAM $M = 4, 16, 64$, la adaptación se hace ...
 - en saltos de 6 dB de la SNR que corresponden a
 - velocidades: R_1 (4-QAM), $2 R_1$, $3 R_1$...
- Es complicado usar valores intermedios

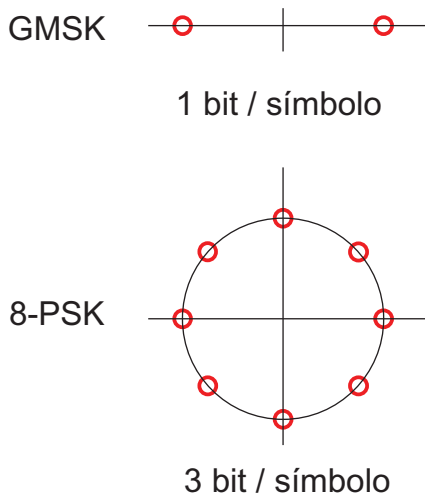


- Para cada nivel de modulación se podría usar **codificación de canal** ...
... con **diferentes tasas de codificación**

Adaptación conjunta de la modulación y de la tasa de codificación



Ejemplo 1 EGPRS



Esquema de codificación		<i>kbit/s</i>
GMSK	0,53	8,8
	0,66	11,2
	0,85	14,8
	1	17,6
8-PSK	0,38	22,4
	0,49	29,6
	0,76	44,8
	0,82	54,4
	1	59,2

Ejemplo 2 UMTS – LTE

Esquema de codificación	Modulación	Nivel de modulación q bit/simb (codificados)	Tasa de codificación k/m	bit/simb (sin codificar)	SNR_{\min} (dB) $BLER_T = 10^{-1}$	Δ dB
1	4-QAM	2	0.076	0,152	-6,9	
2			0.12	0,24	-4,9	2,0
3			0.19	0,38	-2,6	2,3
4			0.33	0,66	-0,8	1,8
5			0.44	0,88	0,9	1,7
6			0.59	1,18	2,9	2,0
7	16-QAM	4	0.37	1,48	4,8	1,9
8			0.48	1,92	6,8	2,0
9			0.6	2,4	8,7	1,9
10	64-QAM	6	0.45	2,7	10,4	1,7
11			0.55	3,3	12,2	1,8
12			0.65	3,9	14,0	1,8
13			0.75	4,5	16,1	2,1
11			0.85	5,1	17,7	1,6
15			0.95	5,7	20,0	2,3

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Concepto

Aumento de la tasa de codificación: perforado

Reducción de la tasa de codificación: repetición

Adaptación conjunta de la modulación y la codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación

Adaptación MIMO

Retransmisión

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación - Canal Rayleigh

Bit/simb: entero par

Bit/simb: valores no enteros

Comparación con entrelazado sin adaptación

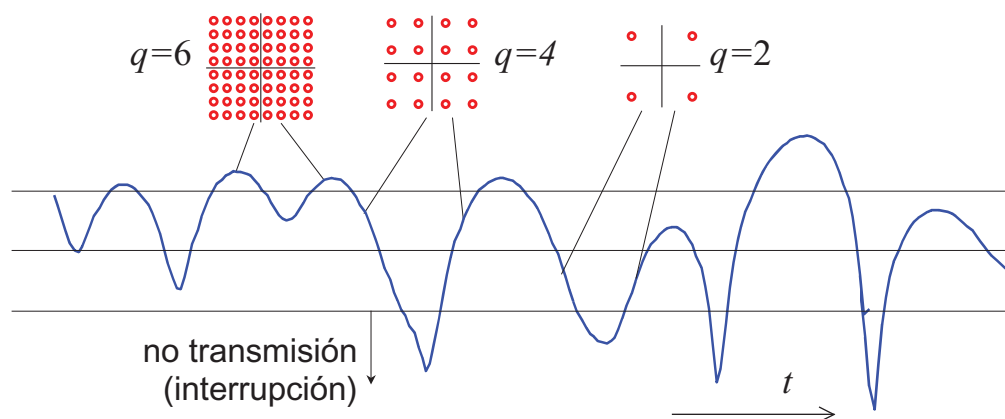
Ejemplos

Adaptación MIMO

Retransmisión

Canal Rayleigh de variación lenta. Modulación adaptativa

Prestaciones



¿Velocidad media?

$$F_{\gamma}(\gamma) = 1 - e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}$$

bit/simb	región
0	$\gamma < \gamma_1$
2	$\gamma_1 < \gamma < \gamma_2$
4	$\gamma_2 < \gamma < \gamma_3$
6	$\gamma_3 < \gamma$

Canal Rayleigh de variación lenta. Modulación adaptativa

Prestaciones

Umbrales	$\gamma_i > (M_i - 1) \cdot \Gamma(P_b)$
Velocidad (bit/simb) para región i	$b_i = \log_2 M_i$
Probabilidad de estar en la región i	$P(\gamma_i < \gamma < \gamma_{i+1}) =$ $= F_\gamma(\gamma_{i+1}) - F_\gamma(\gamma_i) = e^{-\frac{\gamma_i}{\bar{\gamma}}} - e^{-\frac{\gamma_{i+1}}{\bar{\gamma}}}$
Velocidad media (bit/simb)	$R = \sum_i b_i \cdot P(\gamma_i < \gamma < \gamma_{i+1})$
En cada región se añaden $(b_i - b_{i-1})$ bits	$R = \sum_i (b_i - b_{i-1}) \cdot e^{-\frac{\gamma_i}{\bar{\gamma}}} \quad (b_0 = 0)$

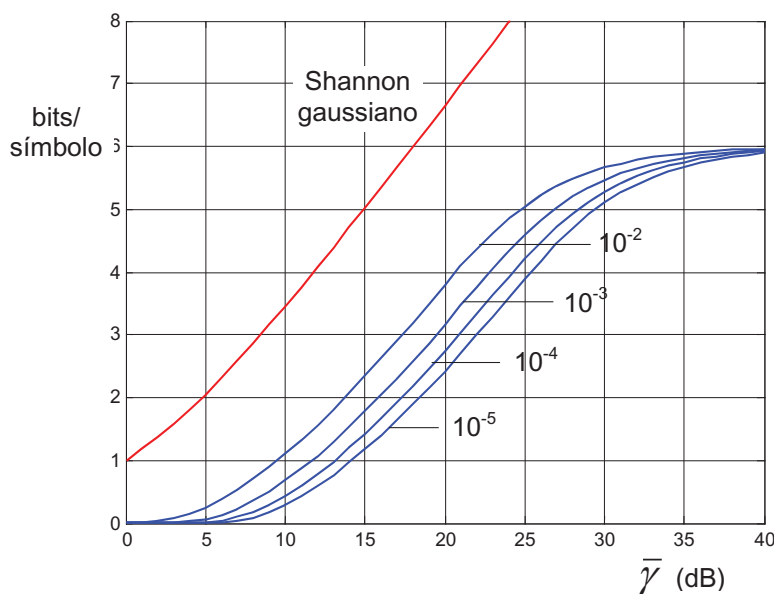
Canal Rayleigh de variación lenta. Modulación adaptativa

Prestaciones

Modulaciones:

4-QAM, 16-QAM, 64-QAM

$$R = \sum_i b_i \cdot P(\gamma_i < \gamma < \gamma_{i+1}) = \sum_i (b_i - b_{i-1}) \cdot e^{-\frac{\gamma_i}{\bar{\gamma}}}$$



Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación - Canal Rayleigh

Bit/simb: entero par

Bit/simb: valores no enteros

Comparación con entrelazado sin adaptación

Ejemplos

Adaptación MIMO

Retransmisión

Canal Rayleigh de variación lenta. Modulación adaptativa

Prestaciones valores continuos de b

¿Cuánto se pierde por usar sólo constelaciones cuadradas?

Supongamos que se puede usar cualquier valor del número de bits ajustado a γ

$$b(\gamma) = \log_2 \left(1 + \frac{\gamma}{\Gamma(P_b)} \right)$$

Velocidad media (bit/simb): $R = \int b(\gamma) f_\gamma(\gamma) d\gamma$ con $f_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \cdot e^{-\frac{\gamma}{\gamma}}$

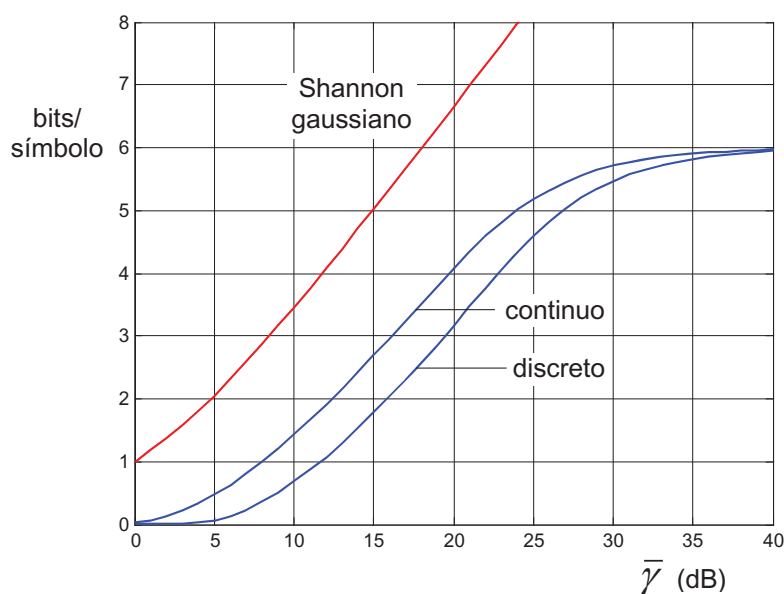
$$R_{cont} = \frac{1}{\gamma} \int \log_2 \left(1 + \frac{\gamma}{\Gamma(P_b)} \right) \cdot e^{-\frac{\gamma}{\gamma}} d\gamma$$

Canal Rayleigh de variación lenta. Modulación adaptativa

Prestaciones

Discreto: 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM
 P_b objetivo 10^{-3}

Continuo: $b = 2$ a 6
 P_b objetivo 10^{-3}



se pierden ~ 3 dB

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación - Canal Rayleigh

Bit/simb: entero par

Bit/simb: valores no enteros

Comparación con entrelazado sin adaptación

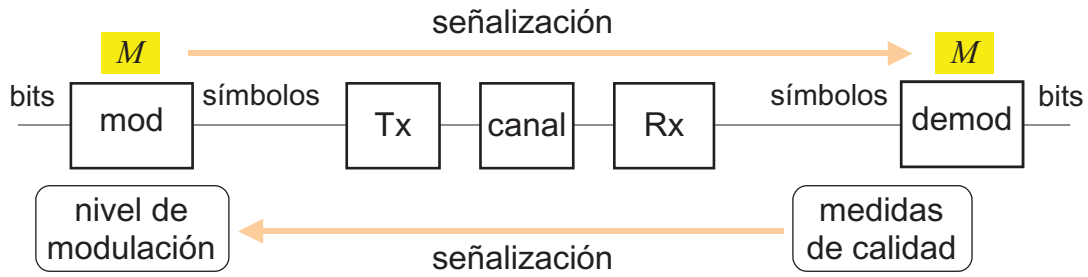
Ejemplos

Adaptación MIMO

Retransmisión

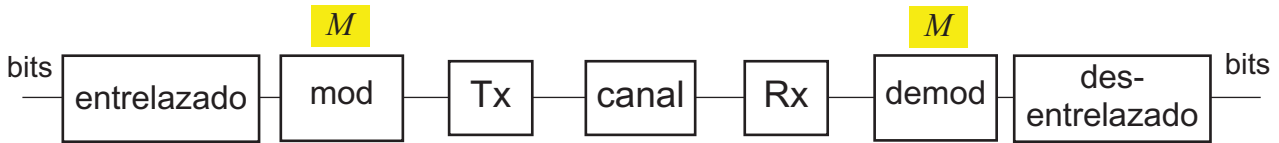
Comparación

Modulación adaptativa



M se adapta a valor instantáneo de γ instantánea (con restricción de $P_b(\gamma)$)

Modulación fija con entrelazado



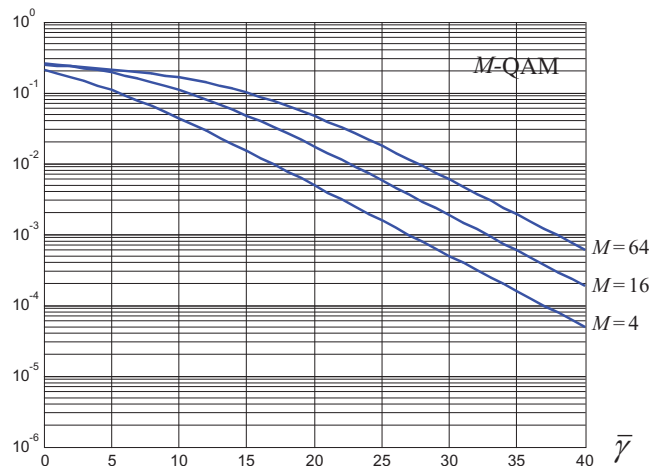
M se selecciona para P_b media objetivo según γ media

Canal Rayleigh con entrelazado

Fórmula aproximada

Comportamiento asintótico $\alpha_M / \log_2 M \approx 1$ (0,5 a 1 para $b = 2$ a 8)

$$\bar{\gamma} \rightarrow \infty \quad P_b \rightarrow \frac{1}{\log_2 M} \cdot \frac{\alpha_M}{2\beta_M} \cdot \frac{1}{\bar{\gamma}} \approx \frac{1}{2\beta_M} \cdot \frac{1}{\bar{\gamma}}$$



Canal Rayleigh con entrelazado

Fórmula aproximada

Comportamiento asintótico $\alpha_M / \log_2 M \approx 1$ (0,5 a 1 para $b = 2$ a 8)

$$\bar{\gamma} \rightarrow \infty \quad P_b \rightarrow \frac{1}{\log_2 M} \cdot \frac{\alpha_M}{2\beta_M} \cdot \frac{1}{\bar{\gamma}} \approx \frac{1}{2\beta_M} \cdot \frac{1}{\bar{\gamma}}$$

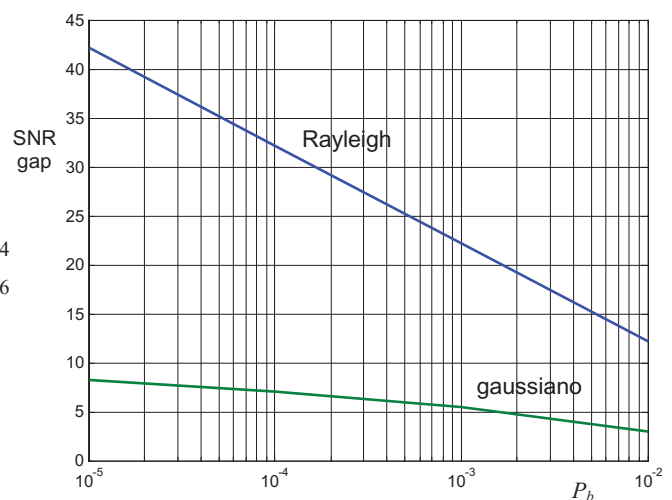
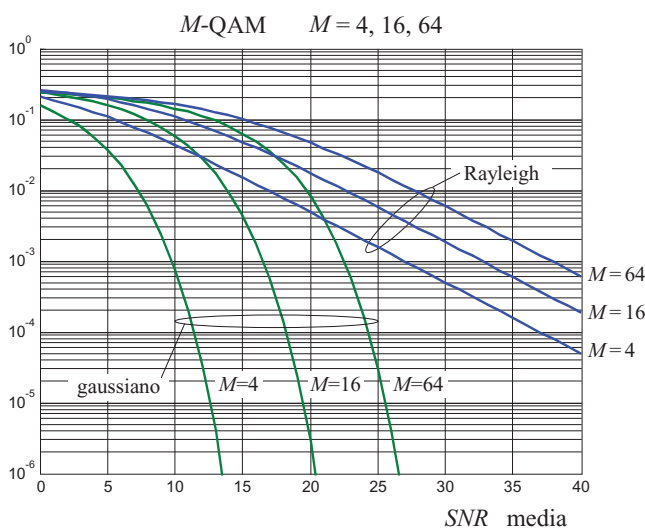
$$P_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{M-1}{3} \cdot \frac{1}{\bar{\gamma}} \quad \text{despejando } M: \quad M = 1 + 6P_b \bar{\gamma}$$

$$b = \log_2 M = \log_2 (1 + 6P_b \bar{\gamma}) = \log_2 \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{\Gamma_R(P_b)} \right)$$

SNR gap de canal Rayleigh con entrelazado $\Gamma_R(P_b) = \frac{1}{6P_b}$

Canal Rayleigh con entrelazado

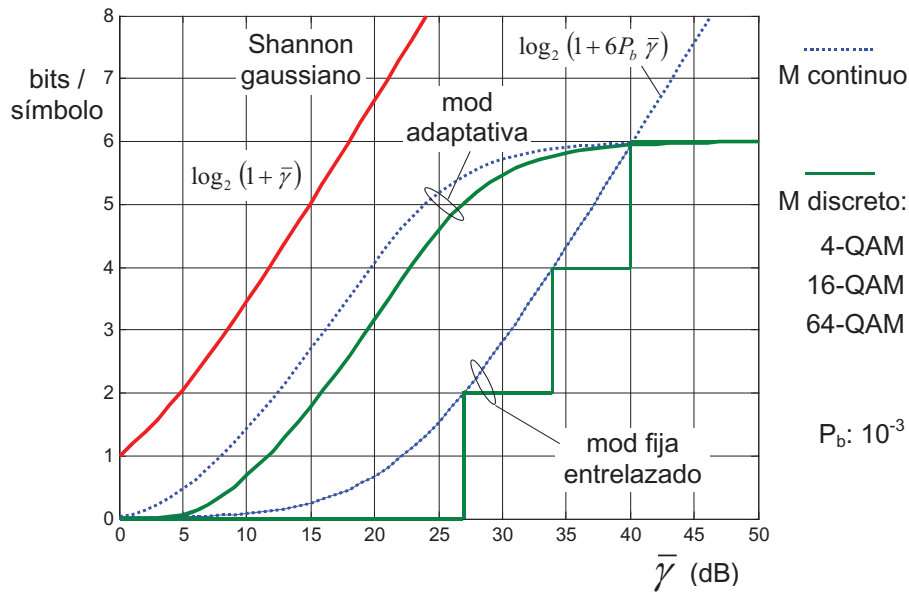
SNR gap



$$\Gamma_G(P_b) \approx \frac{-\ln(5P_b)}{1,6} \quad \Gamma_R(P_b) \approx \frac{1}{6P_b}$$

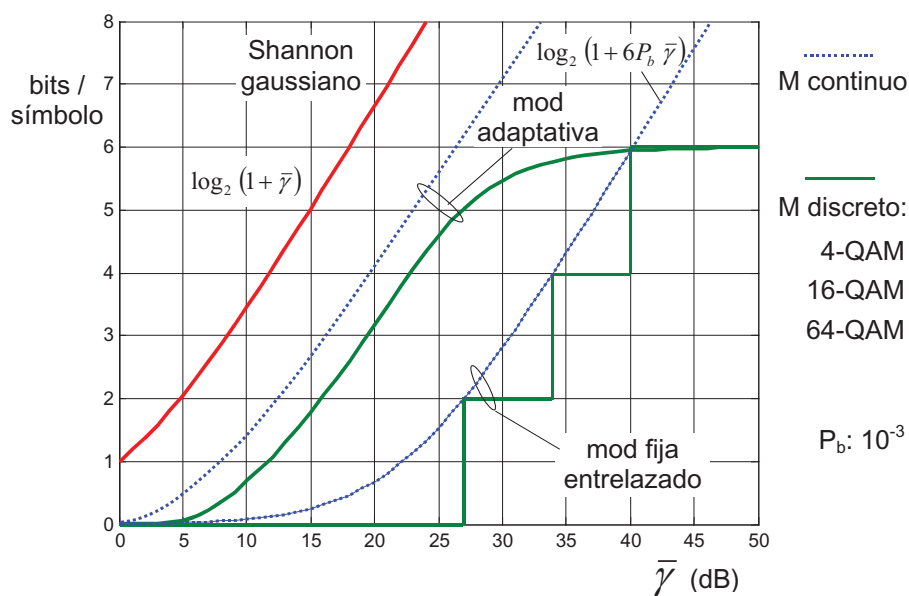
Comparación Modulación adaptativa - Modulación fija con entrelazado

Canal Rayleigh



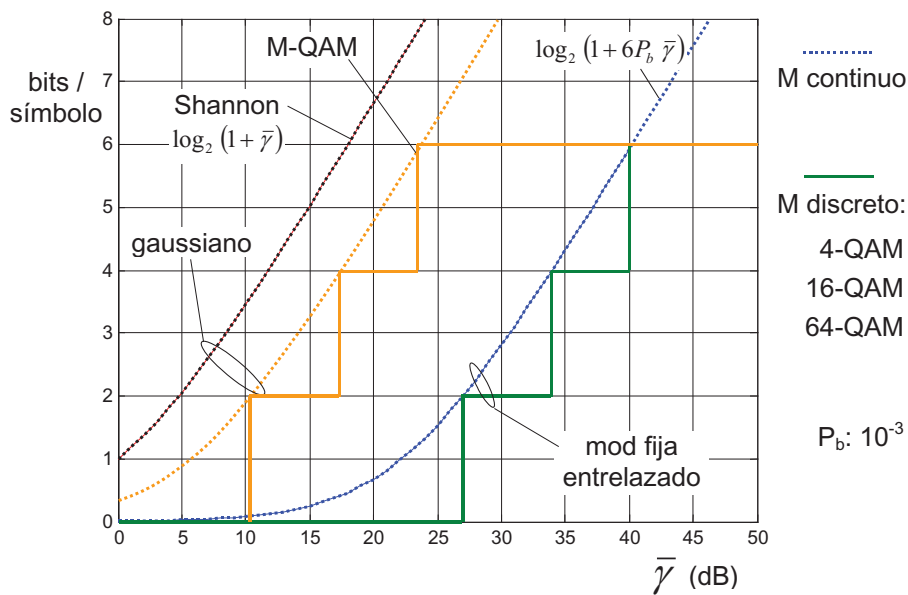
Comparación Modulación adaptativa - Modulación fija con entrelazado

Canal Rayleigh



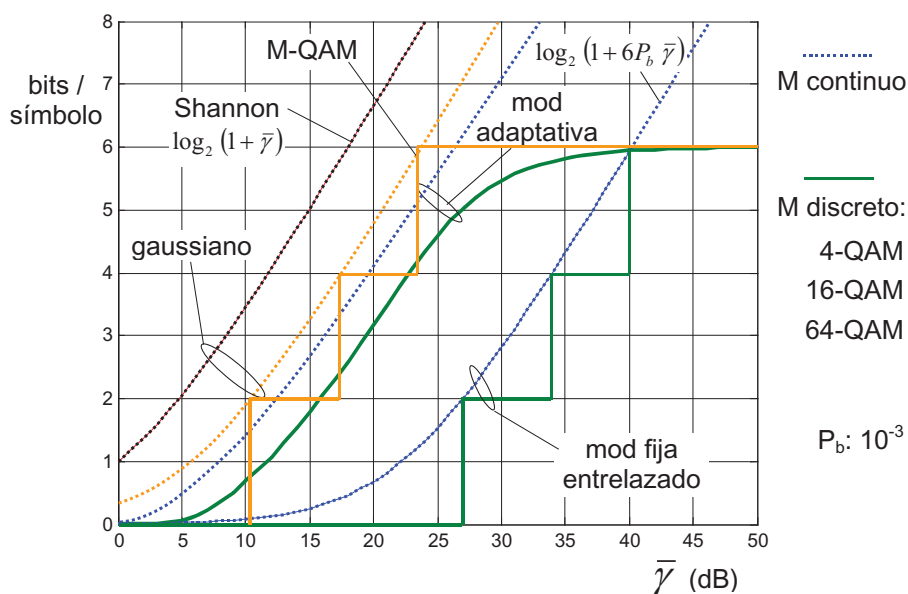
Comparación Modulación fija con entrelazado

Canal Rayleigh - Canal gaussiano



Comparación Modulación adaptativa - Modulación fija con entrelazado

Canal Rayleigh - Canal gaussiano



- Canal Rayleigh con MA continua ~2 dB de canal gaussiano (discreta: ~5 dB)

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación - Canal Rayleigh

Bit/simb: entero par

Bit/simb: valores no enteros

Comparación con entrelazado sin adaptación

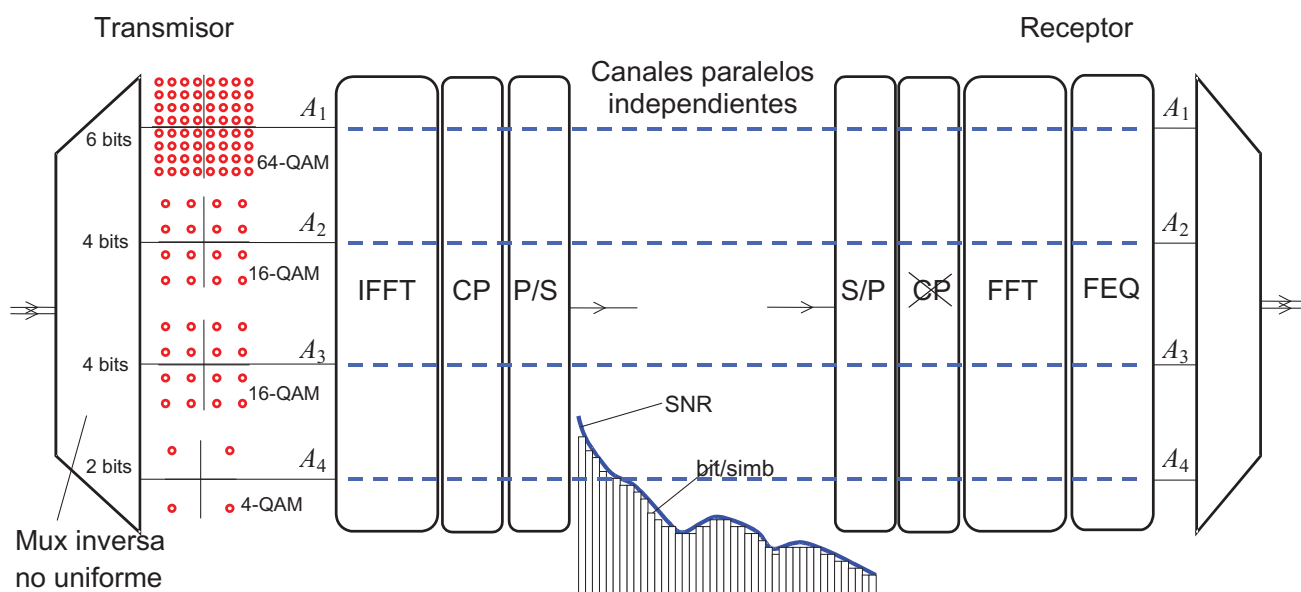
Ejemplos OFDM

Adaptación MIMO

Retransmisión

Adaptación de la modulación - Multiportadora - OFDM

Canal invariante - ADSL

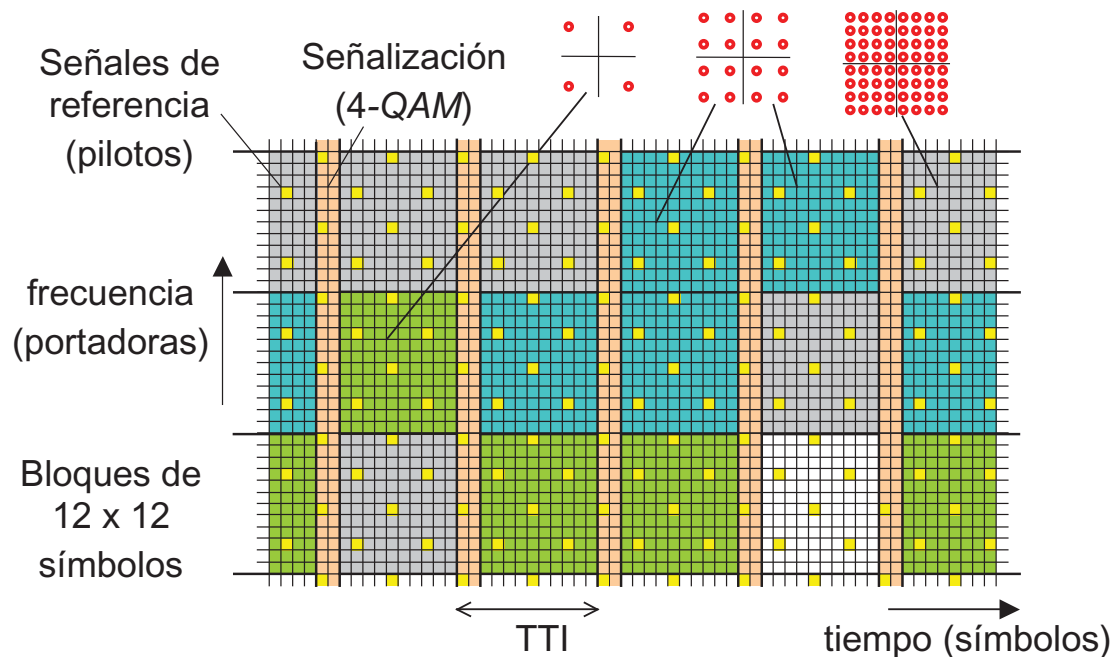


Modulación: reparto de bits (1 a 15)

Codificación de canal: interior: convolucional 3/4, 8 estados exterior: RS (255,223)

Adaptación de la modulación - Multiportadora - OFDM

Canal variante - LTE

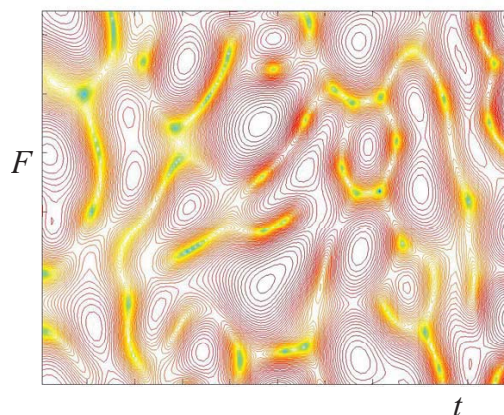
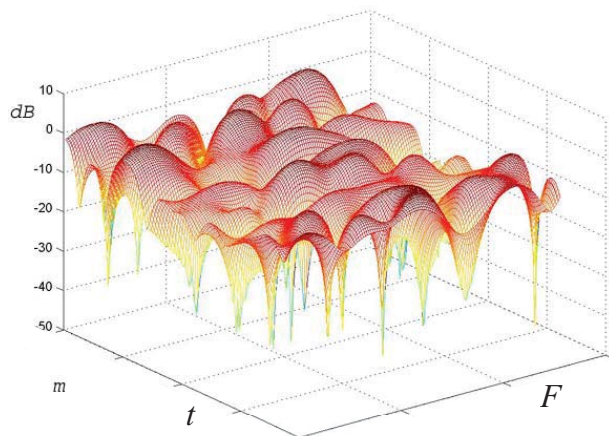


- En cada nuevo bloque (TTI) se pueden cambiar
 - las modulaciones y las tasas de codificación (**esquema de codificación**)

Canal multicamino sin visión directa (NLOS). Banda ancha

Canal de banda ancha con movimiento

- Para cada frecuencia, la ganancia varía temporalmente como en banda estrecha
- Evoluciones temporales a dos frecuencias separadas $\Delta\Omega$ son diferentes a menos que $\Delta\Omega \ll B_c$
- **Desvanecimientos** en tiempo cada $\approx T_c$ en frecuencia cada $\approx B_c$



Ejemplo 2 UMTS – LTE

Esquema de codificación	Modulación	Nivel de modulación q bit/simb (codificados)	Tasa de codificación k/m	bit/simb (sin codificar)	SNR_{\min} (dB) $BLER_T = 10^{-1}$	Δ dB
1	4-QAM	2	0.076	0,152	-6,9	
2			0.12	0,24	-4,9	2,0
3			0.19	0,38	-2,6	2,3
4			0.33	0,66	-0,8	1,8
5			0.44	0,88	0,9	1,7
6			0.59	1,18	2,9	2,0
7	16-QAM	4	0.37	1,48	4,8	1,9
8			0.48	1,92	6,8	2,0
9			0.6	2,4	8,7	1,9
10	64-QAM	6	0.45	2,7	10,4	1,7
11			0.55	3,3	12,2	1,8
12			0.65	3,9	14,0	1,8
13			0.75	4,5	16,1	2,1
11			0.85	5,1	17,7	1,6
15			0.95	5,7	20,0	2,3

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

Adaptación de la tasa de codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación

Adaptación MIMO

Retransmisión

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

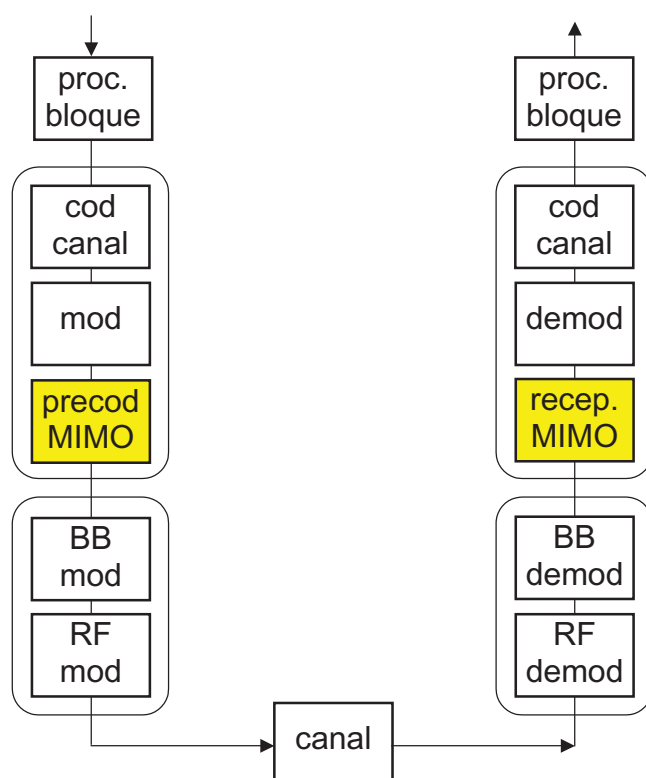
Adaptación de la tasa de codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación

Adaptación MIMO

Retransmisión

Sistema de transmisión digital



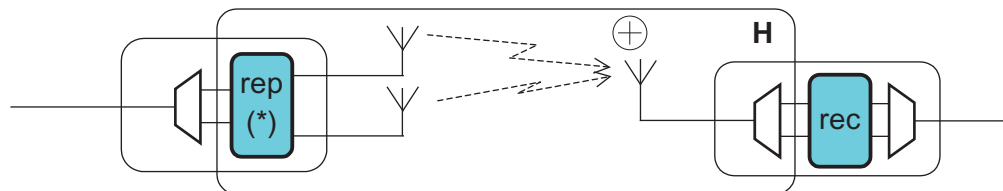
Adaptación de enlace

Adaptación de la precodificación

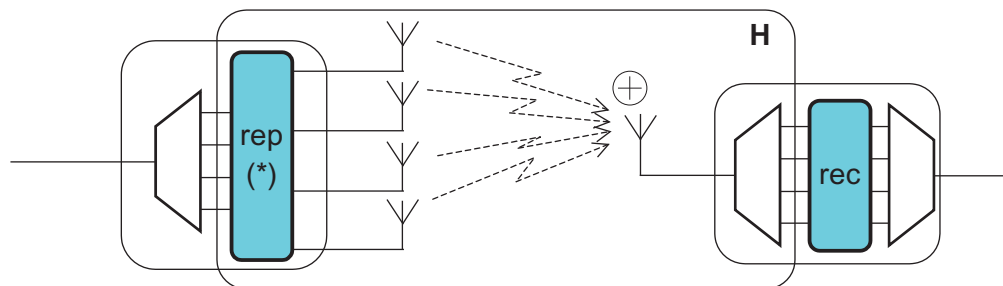
- STBC/SFBC
- Conformación de haz (*beamforming*)
- Multiplexación espacial (MIMO mux)
- Libros de códigos

Diversidad espacial en transmisión sin canal de retorno

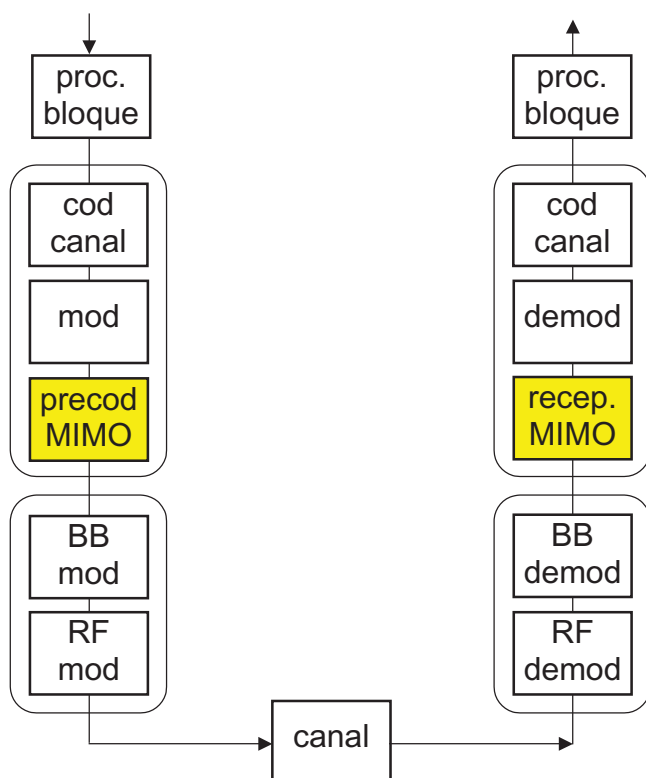
- Se agrupan en un bloque varios símbolos (en tiempo o en frecuencia)
- Se repiten por las antenas con su valor y el conjugado (precodificación *Alamouti*)
- Procesando conjuntamente el bloque recibido se pueden obtener combinaciones coherentes de las señales transmitidas



STBC / SFBC



Sistema de transmisión digital



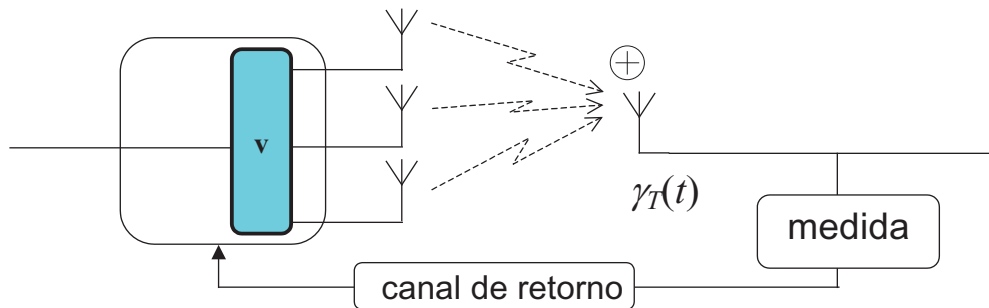
Adaptación de enlace

Adaptación de la precodificación

- STBC/SFBC
- Conformación de haz (*beamforming*)
- Multiplexación espacial (MIMO mux)
- Libros de códigos

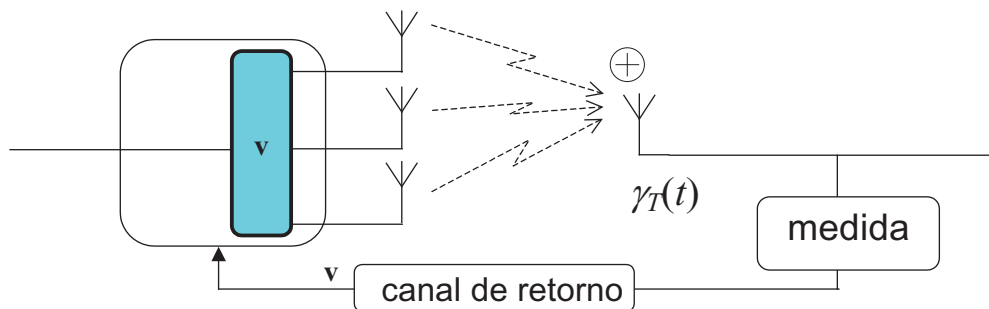
Diversidad espacial en transmisión

- Se envía la misma señal por todas las antenas. Igual (EGC) o con ganancias (MRC)
- La única antena receptora suma todas las señales



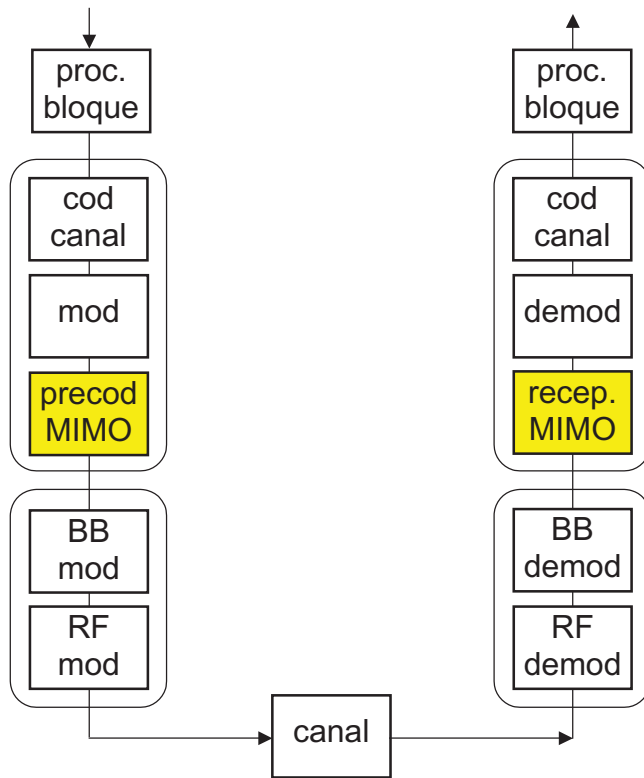
- Se necesita que el transmisor conozca las medidas de los canales ...
... para compensar fases o ponderar
- Medida en receptor y canal de retorno para enviar medidas
- **Conformación de haz (Beamforming)**: combinar las señales para “apuntar la potencia hacia la antena receptora

Adaptación de la Conformación de haz (Beamforming)



- Para **estimar el canal** se envían **pilotos** por las antenas,
– **separados** en tiempo o frecuencia (OFDM)
- El receptor calcula el **vector de precodificación** (ganancias complejas)
- El receptor envía el vector de precodificación por el **canal de retorno**

Sistema de transmisión digital

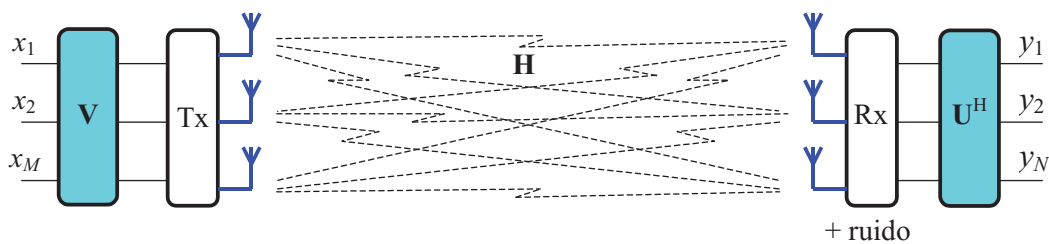


Adaptación de enlace

Adaptación de la precodificación

- STBC/SFBC
- Conformación de haz (*beamforming*)
- Multiplexación espacial (MIMO mux)
- Libros de códigos

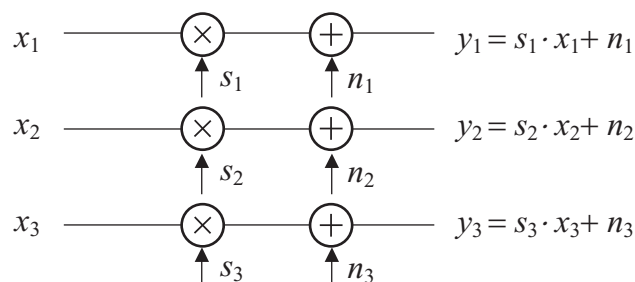
Sistemas MIMO con precodificación - SVD



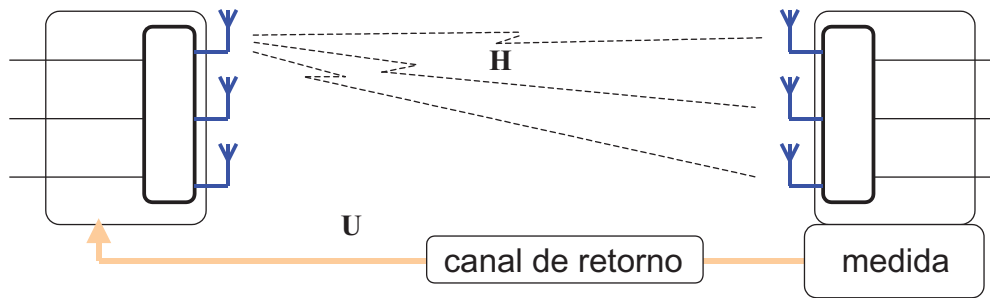
Descomposición en valores singulares (SVD *Singular Value Decomposition*)

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H$$

\mathbf{U} \mathbf{V} matrices ortogonales unitarias $\mathbf{U}^H \mathbf{U} = \mathbf{I}_M$ $\mathbf{V}^H \mathbf{V} = \mathbf{I}_N$
 $\mathbf{\Sigma}$ valores singulares $M \times N$



Adaptación de la Multiplexación espacial (MIMO)

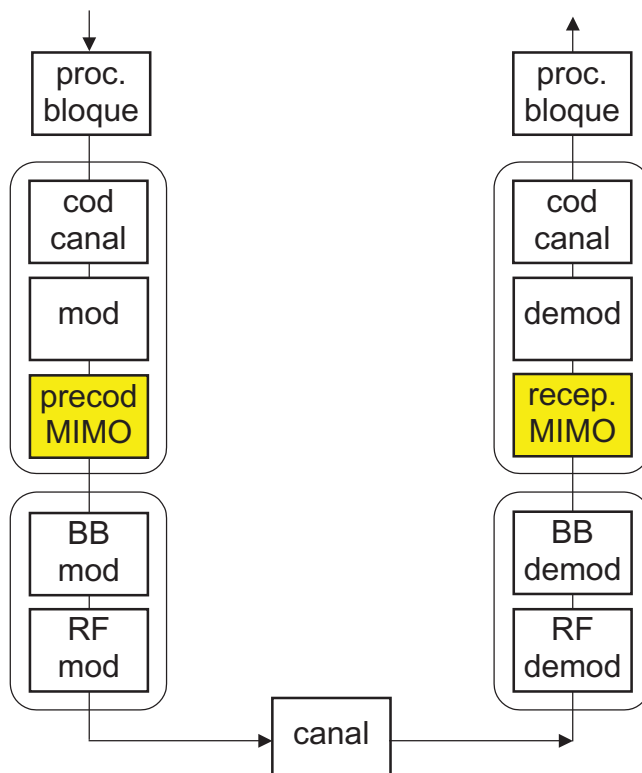


- Para **estimar el canal (H)** se envían **pilotos** por las antenas,
 - **separados** en tiempo o frecuencia (OFDM)
- El receptor calcula la matriz del canal **H**

Precodificación ideal

- El receptor hace la descomposición $\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H$
- El receptor envía la matriz de precodificación **U** por el **canal de retorno**

Sistema de transmisión digital



Adaptación de enlace

Adaptación de la precodificación

- STBC/SFBC
- Conformación de haz (*beamforming*)
- Multiplexación espacial (MIMO mux)
- **Libros de códigos**

- MIMO: enviar la matriz \mathbf{U} es una señalización muy costosa:
(matriz de números complejos)
- *Beamforming*: enviar el vector también es muy costoso
(vector de números complejos)
- En **modulación/codificación adaptativa** la señalización es mucho menor
 - No se envía la SNR sino el **CQI**: un número entero de 0 a 15 (**4 bits**)
 - El número indica un rango de valores de SNR: CQI es la SNR “**cuantificada**”
 - Cuanto más fina es la cuantificación es mejor el ajuste ...
... pero mayor la señalización
- Ejemplo. LTE
 - CQI: 4 bits. 15 valores de SNR con separación de ≈ 2 dB
 - Los 15 valores corresponden a 15 esquemas de codificación determinados

Uso de libro de códigos

- Se puede definir un **conjunto limitado** de
 - vectores de *beamforming*
 - matrices de precodificación
- Tx y Rx conocen ese conjunto de vectores y matrices (**libro de códigos**) y ...
... acuerdan un índice para cada uno de sus elementos:

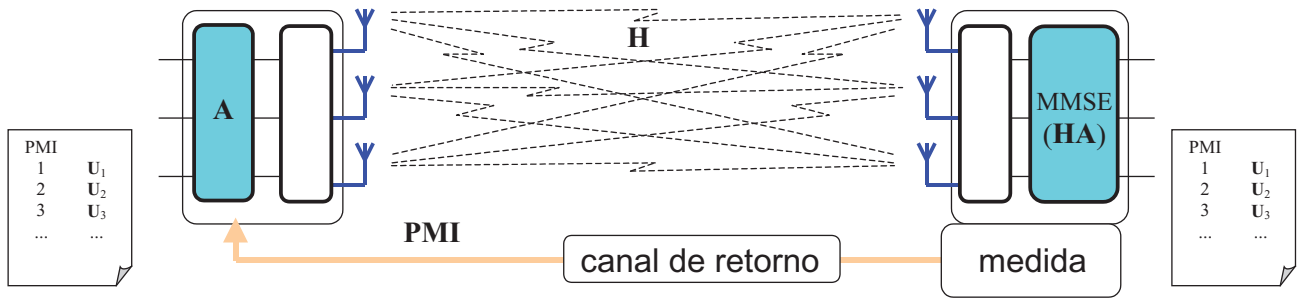
PMI *Precoding Matrix Indicator*

- A partir de las medidas, el receptor...
... decide la precodificación **más adecuada**
... **de las disponibles** en el **libro de códigos** y...
... **envía su índice (PMI)** al transmisor

PMI	
1	\mathbf{U}_1
2	\mathbf{U}_2
3	\mathbf{U}_3
...	...

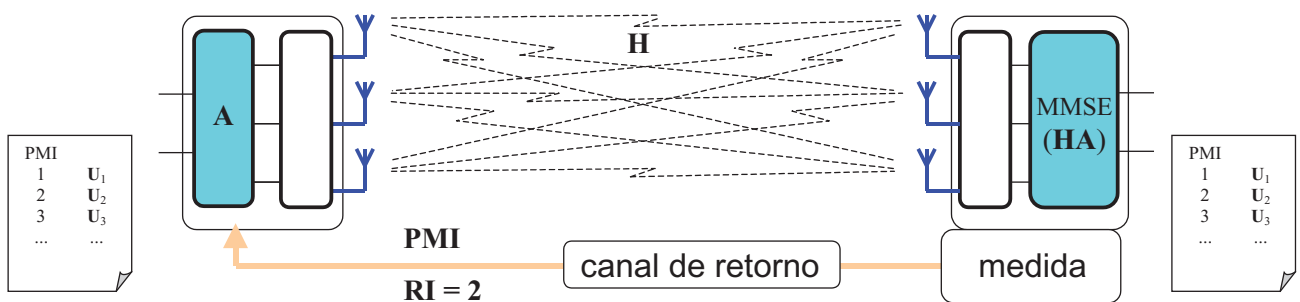
- Equivale a una **cuantificación** de las matrices y vectores de precodificación

Uso de libro de códigos



- Equivale a una **cuantificación** de las matrices y vectores de precodificación
- Al no usarse la precodificación ideal, el receptor será **MMSE**
- El receptor decide el PMI con el que la recepción MMSE sería óptima

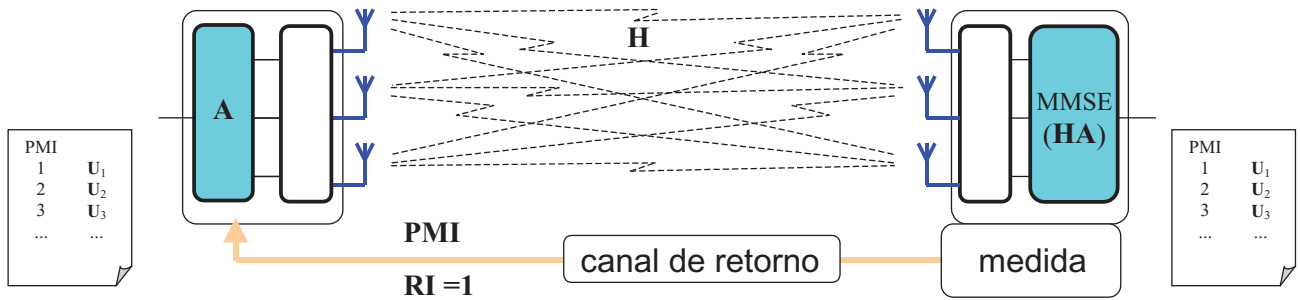
Uso de libro de códigos



Adaptación de rango

- El receptor sugiere el número de flujos a transmitir (según el rango estimado de H)
- Si hay valores singulares (de la matriz Σ) muy pequeños es mejor descartarlos y “bajar el rango” transmitiendo menos flujos
- El receptor envía un Indicador de Rango: **RI Rank Indicator**

Uso de libro de códigos



Adaptación de rango

- El receptor sugiere el número de flujos a transmitir (según el rango estimado de H)
- Si hay valores singulares (de la matriz Σ) muy pequeños es mejor descartarlos y “bajar el rango” transmitiendo menos flujos
- El receptor envía un Indicador de Rango: **RI Rank Indicator**
- Precodificación con rango 1 (un flujo) equivale a *beamforming*

Ejemplo para 2 antenas transmisoras

Libro de códigos		Flujos	precodificación	
RI-PMI	técnica		formato matrices	elementos del libro
1-0	sólo una antena	1	1x1	no precod
1-1	STBC/SFBC	1	2x2	el código de Alamouti
1-2	Beamforming	1	2x1	vector 2
1-3		1	2x1	vector 3
1-4		1	2x1	vector 4
...		1	...	...
2-1	Multiplexing	2	2x2	matriz 1
2-2		2	2x2	matriz 2
2-3		2	2x2	matriz 3
...		2	...	...

Adaptación de la precodificación. Uso de libro de códigos

Libro de códigos

<i>RI-PMI</i>	<i>técnica</i>	<i>Flujos</i>	<i>formato</i>	<i>precod</i>
1-0	sólo una antena	1	1x1	no precod
1-1	STBC/SFBC	1	4x4	código STBC
1-2	<i>Beamforming</i>	1	4x1	vector 2
1-3		1	4x1	vector 3
1-4		1	4x1	vector 4
...		1	...	...
2-1	<i>Multiplexing</i> Rango 2	2	4x2	matriz 21
2-2		2	4x2	matriz 22
2-3		2	4x2	matriz 23
...		2	...	...
3-1	<i>Multiplexing</i> Rango 3	3	4x3	matriz 31
3-2		3	4x3	matriz 32
3-3		3	4x3	matriz 33
...		3	...	...
4-1	<i>Multiplexing</i> Rango 4	4	4x4	matriz 41
4-2		4	4x4	matriz 42
4-3		4	4x4	matriz 43
...		4	...	...

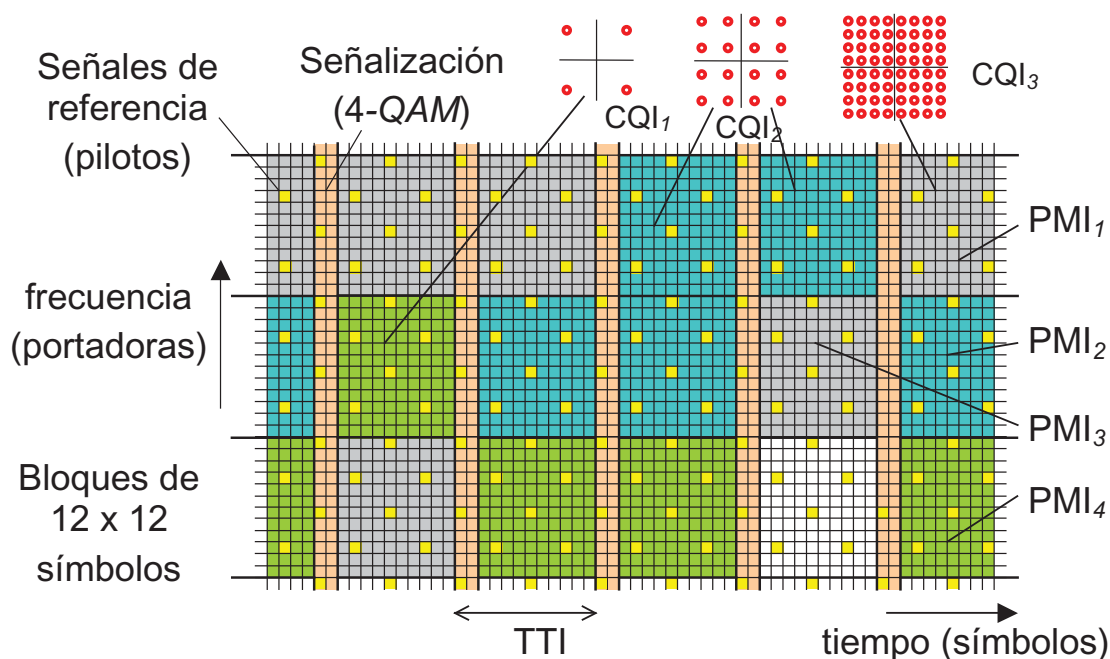
Ejemplo

4 antenas transmisoras

- Receptor estimar T_c . Sólo es posible adaptar si $TTI \ll T_c$
- Si no se puede adaptar: se sugiere SFBC/SFBC
- Si se puede adaptar: se selecciona el rango y un vector o matriz de precodificación

Adaptación de la modulación - Multiportadora - OFDM

Canal variante - LTE



- En cada nuevo bloque (TTI) se pueden cambiar
 - las modulaciones, tasas de codificación y las **precodificaciones** (PMI, RI)

Adaptación de enlace

Adaptación de la modulación

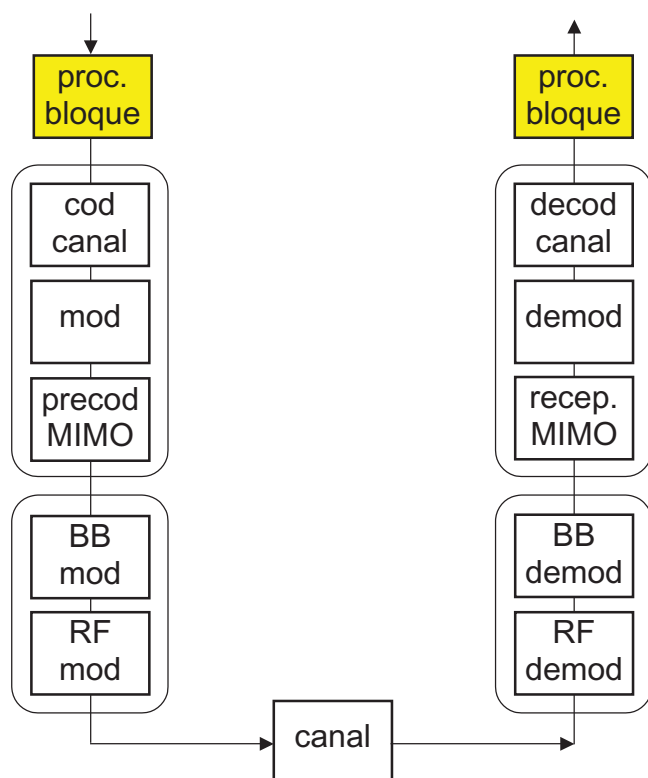
Adaptación de la tasa de codificación

Prestaciones de sistemas con adaptación

Adaptación MIMO

Retransmisión

Sistema de transmisión digital

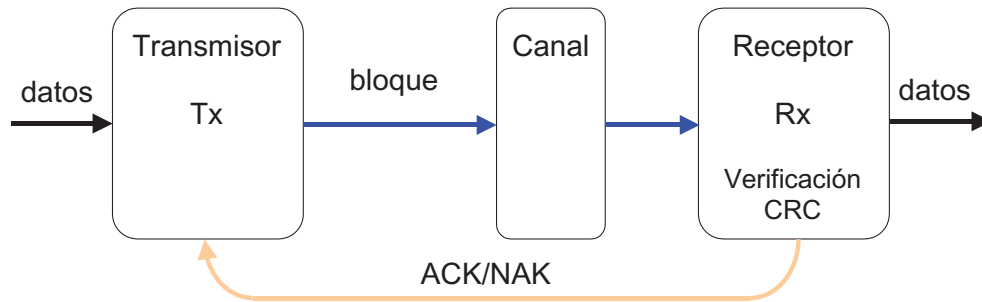


Transmisión en bloques
con secuencia de verificación
(CRC)

Retransmisión

- ARQ
- H-ARQ

Transmisión en bloques: Petición automática de retransmisión (ARQ)



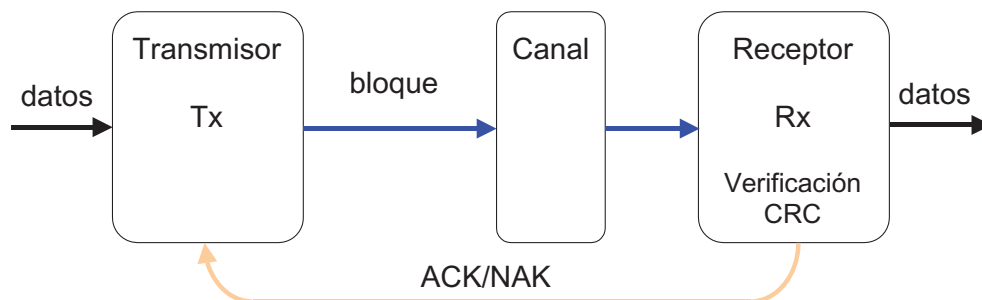
El receptor ...

- puede usar una secuencia de verificación para detectar error en el bloque y ...
- puede **pedir** al transmisor que **envíe** el bloque **de nuevo** (van numerados)

Petición automática de retransmisión: ARQ *Automatic Repeat Request*

- Necesita un canal de retorno para señalización de **confirmaciones**
 - NAK: indica bloque recibido erróneamente: petición de retransmisión
 - ACK: indica bloque recibido correctamente (Tx puede liberarlo de su memoria)

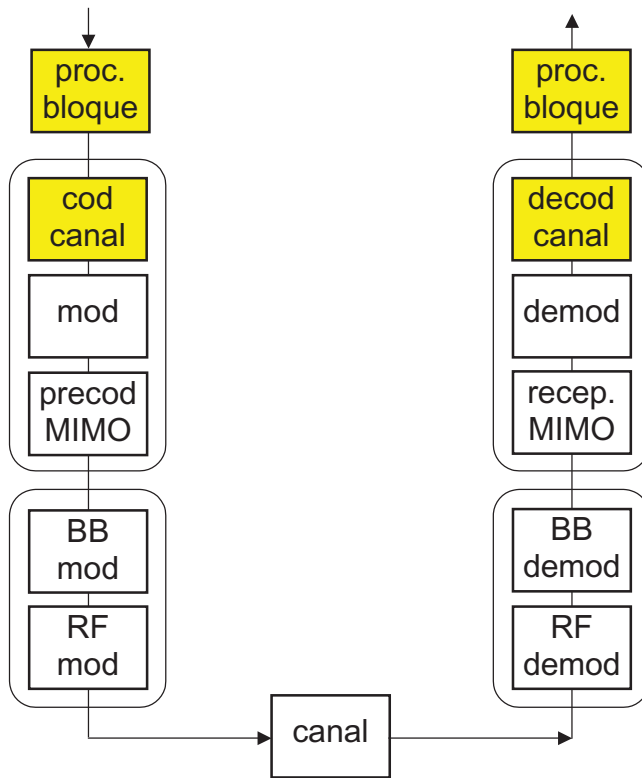
Transmisión en bloques: Petición automática de retransmisión (ARQ)



Probabilidad de error de bloque (BLER)

- P_B es la probabilidad de recibir un bloque erróneo
- Se puede usar ARQ hasta un máximo de N_{tx} transmisiones
- Probabilidad de que finalmente el bloque no se reciba correctamente: $P_B^{N_{tx}}$
 - Ejemplo: $P_B = 10^{-1}$ para $N_{tx} = 2 \rightarrow 10^{-2}$ para $N_{tx} = 3 \rightarrow 10^{-3}$
 - Ejemplo: $P_B = 10^{-2}$ para $N_{tx} = 2 \rightarrow 10^{-4}$ para $N_{tx} = 3 \rightarrow 10^{-6}$

Sistema de transmisión digital

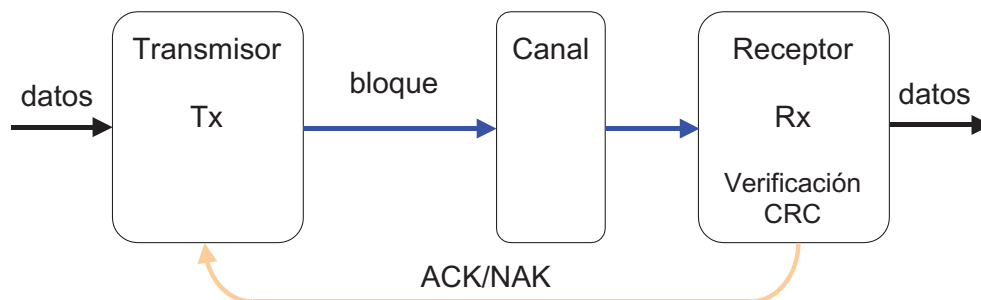


Transmisión en bloques
con secuencia de verificación
(CRC)

Retransmisión

- ARQ
- **H-ARQ**

Transmisión en bloques: ARQ



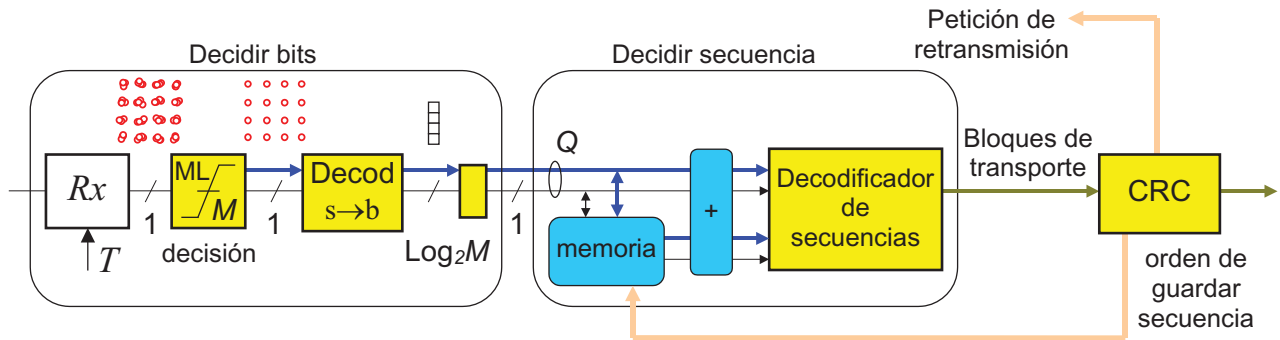
- **ARQ**: el receptor, cuando recibe una retransmisión, no usa la información de los bloques erróneos recibidos anteriormente

Cuanta **mayor información** se tiene, **mejor decisión** se puede tomar

- La **información de las transmisiones anteriores** permitiría tomar una **mejor decisión** sobre cuál ha sido el bloque transmitido

¿Cómo combinar la información recibida con la de transmisiones anteriores?

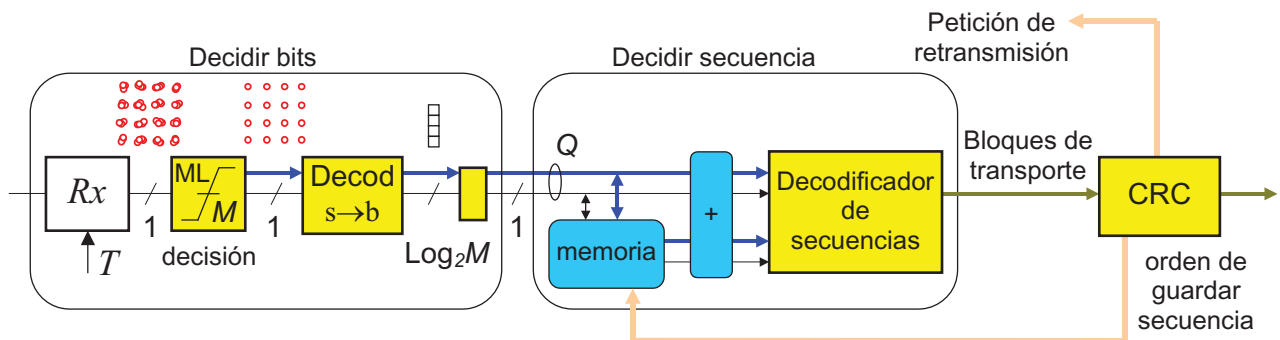
Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)



El receptor ...

- Cuando pide una retransmisión:
 - **guarda** la secuencia binaria recibida (antes del decodificador de secuencias)
- Cuando recibe una retransmisión:
 - **combina** la nueva secuencia recibida con las anteriores y
 - la pasa al decodificador de secuencias

Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)



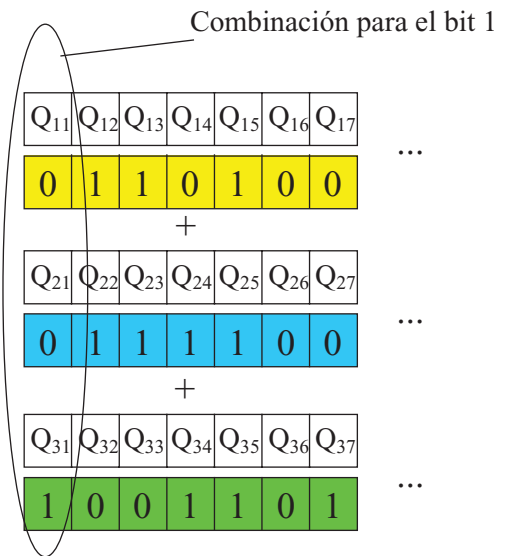
H-ARQ métodos:

- **Combinación de bloques**
 - repetición con decisión blanda
- **Redundancia incremental**
 - reducción progresiva de la tasa de codificación
 - (aumento progresivo de redundancia)

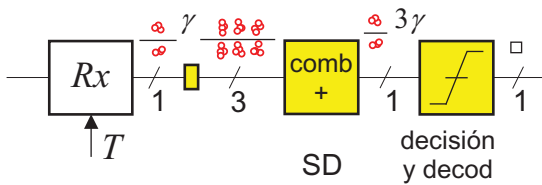
Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)

Combinación de bloques (de Chase)

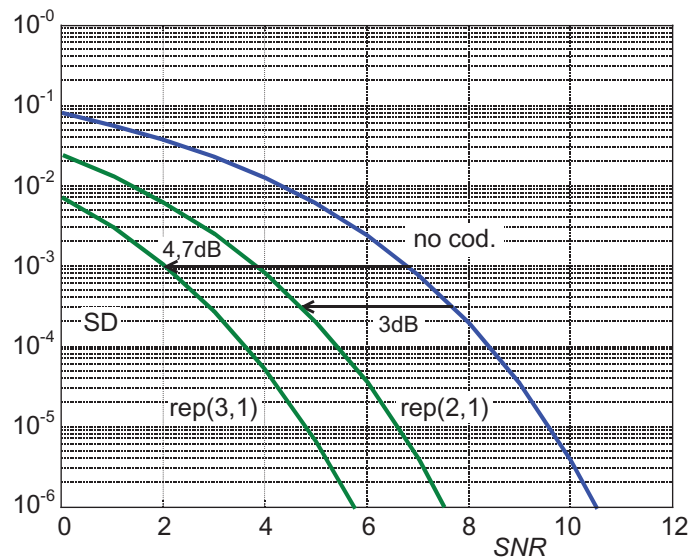
- Se guardan las secuencias binarias con decisiones blandas
- Se suman bit a bit ponderando la suma con las fiabilidades
- Para N_t transmisiones es similar a usar para **cada bit** un código de repetición $(N_t, 1)$ con decisión blanda
- Las repeticiones son las que se obtienen con las retransmisiones
- P_b de la combinación de N_t bits es menor que la de cada bit sin combinar



Codificación de canal. Decisión blanda



factor de repetición	mejora de SNR
× 2	3 dB
× 3	4,7 dB
× 4	6 dB
× 5	7 dB



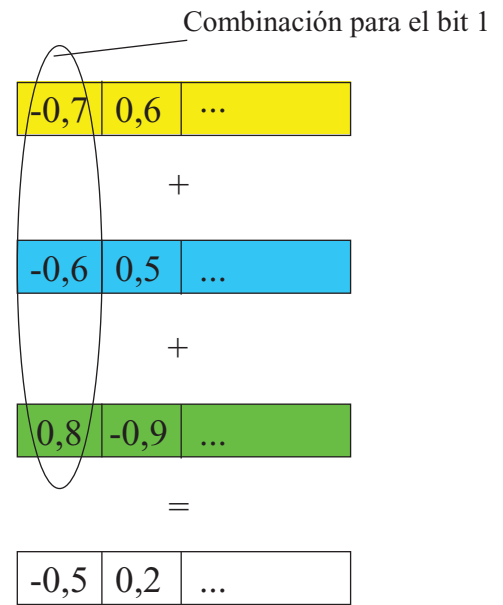
Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)

Combinación de bloques (de Chase)

Ejemplo PAM-2 $\{-1, 1\}$

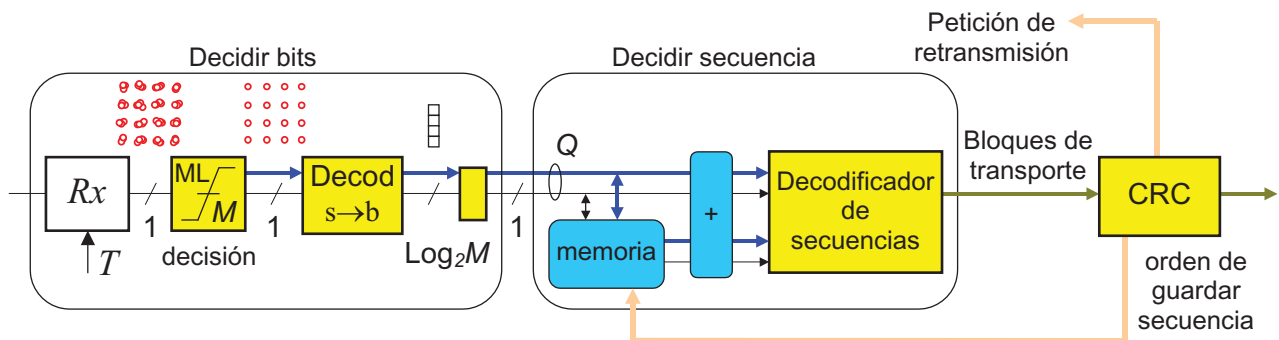
- Se suman los símbolos antes de la decisión
- Equivale a sumar las energías de los bits transmitidos en vez de quedarse sólo con el último
- Incremento SNR_{eff} : $10\log_{10}(N_t)$
- Transmisiones (N_t) incr. SNR

N_t	Ganancia	BLER
1	0 dB	$P_{B1} = P_B(\gamma)$
2	3 dB	$P_{B2} = P_B(2\gamma) < P_{B1}$
3	4,7 dB	$P_{B3} = P_B(3\gamma) < P_{B2}$
4	6 dB	$P_{B4} = P_B(4\gamma) < P_{B3}$



BLER final: $P_{B1} \cdot P_{B2} \cdot P_{B3} \dots$

Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)



H-ARQ métodos:

- **Combinación de bloques**
 - repetición con decisión blanda
- **Redundancia incremental**
 - reducción progresiva de la tasa de codificación
 - (aumento progresivo de redundancia)

Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)

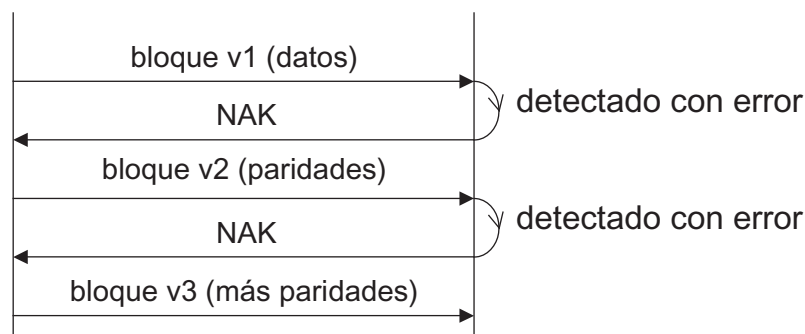
Redundancia incremental

- Se usa una codificación convolucional de **tasa ajustable** (ej.: con perforado)
- Primera transmisión
 - **tasa alta**
 - muy **poca redundancia**
 - casi todos los bits de paridad perforados
- Sucesivas transmisiones (si NAK)
 - (en vez de repetir lo mismo)
 - se envía **información nueva**: bits que se habían perforado
 - el receptor dispone cada vez de más bits de paridad (mayor redundancia)

Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)

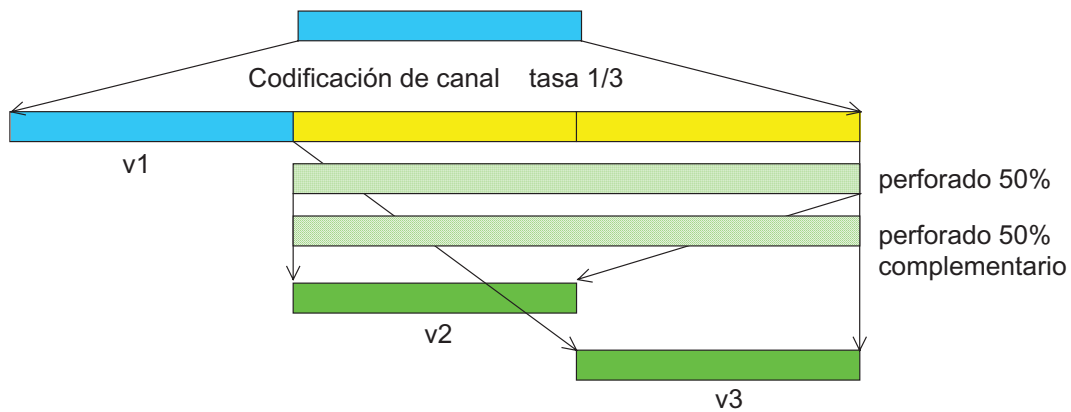
Redundancia incremental

- Codificación convolucional **de tasa ajustable** (ej.: perforado)
- Primera transmisión: **tasa alta**, casi todos los bits de paridad perforados
- Sucesivas transmisiones: **información nueva**: bits que se habían perforado
- Receptor dispone cada vez de más bits de paridad



Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)

Redundancia incremental. Ejemplo a partir de código de tasa 1/3



- Se generan dos versiones perforadas complementarias v2 y v3
- v1 es el mensaje sin redundancia
- Concatenando v1 y v2 se tiene un código perforado de tasa 1/2
- Combinando v2 y v3 se tienen todos los bits de paridad, ...
... que juntos con v1 forman un código de tasa 1/3

Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)

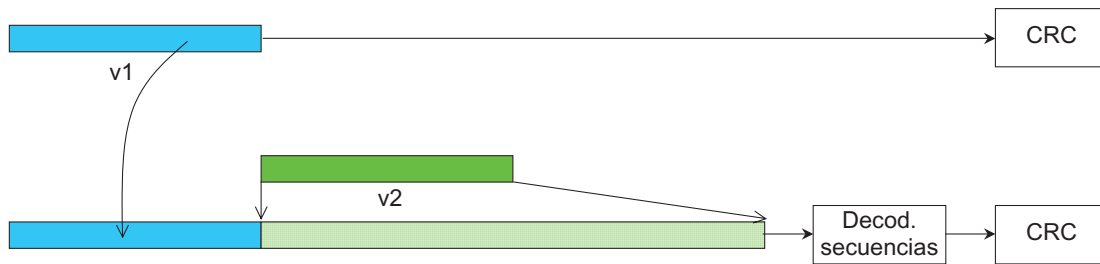
Redundancia incremental. Ejemplo a partir de código de tasa 1/3



- Transmisor envía v1 (mensaje sin redundancia)
- Receptor comprueba CRC → Si hay error se pide retransmisión (y guarda v1)

Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)

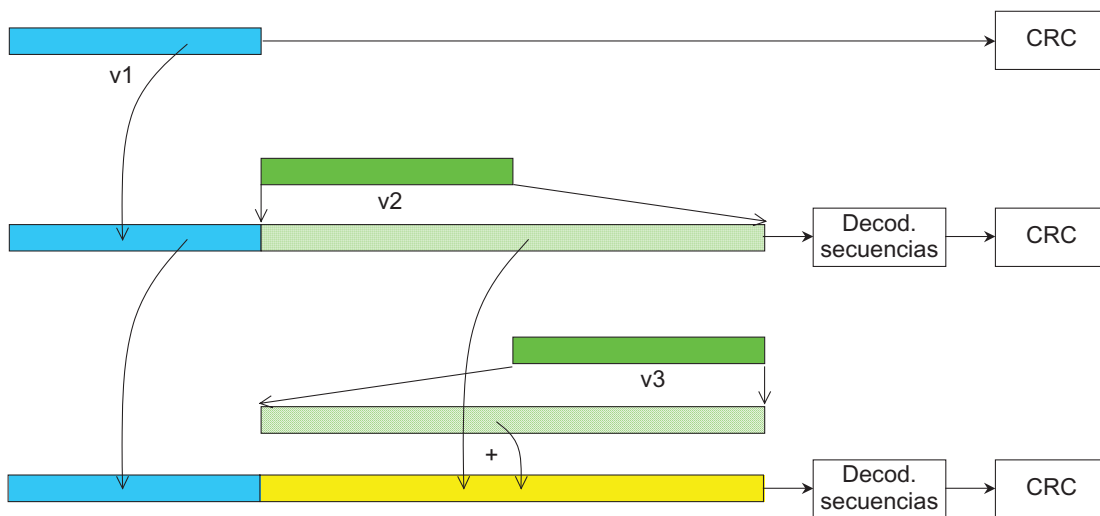
Redundancia incremental. Ejemplo a partir de código de tasa 1/3



- Transmisor envía v_2
- Receptor decodifica la secuencia combinada $[v_1, v_2]$ (tasa 1/2)
- Receptor comprueba CRC → si hay error se pide retransmisión (y guarda v_1 y v_2)

Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)

Redundancia incremental. Ejemplo a partir de código de tasa 1/3



- Transmisor envía v_3
- Receptor decodifica la secuencia combinada $[v_1, v_2, v_3]$ (tasa 1/3)

Transmisión en bloques: ARQ híbrida (H-ARQ)

ARQ

- En cada nueva retransmisión, se envía siempre la misma información
- La probabilidad de error de bloque es la misma en todas las retransmisiones

Redundancia incremental

- Con cada nueva retransmisión, el receptor dispone de secuencias codificadas de tasa creciente:
 - 1ª vez: 1/1 (sin redundancia)
 - 2ª vez: 1/2
 - 1ª vez: 1/3
- La probabilidad de error de bloque es menor cada nueva retransmisión

6.1

Rellene la siguiente tabla con los valores del SNRgap (en dB) de la transmisión QAM a través de canal gaussiano para varios valores de la probabilidad de error binaria [utilice las gráficas entregadas y la fórmula aproximada]

SNRgap (dB)	$P_b=10^{-3}$	$P_b=10^{-4}$	$P_b=10^{-5}$
<i>Gráficas</i>			
<i>Formula aproximada</i>			

6.2

Utilizando el resultado del ejercicio 6.1, rellene la siguiente tabla con los umbrales de SNR (en dB) para varias constelaciones y probabilidades de error objetivo.

	4-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM	128-QAM	256-QAM	512-QAM
$P_b=10^{-3}$							
$P_b=10^{-4}$							
$P_b=10^{-5}$							

6.3

Un sistema de transmisión monoportadora usa modulación adaptativa M-QAM con 0, 2, 4 y 6 bit/símbolo y una velocidad de 1 Mbaudio. Si la SNR medida por el receptor está en cada una de las cuatro regiones en la misma proporción (25 % del tiempo en cada CQI), ¿cuál es la velocidad binaria media de transmisión?

6.4

Un sistema ADSL envía símbolos OFDM con una frecuencia de 4 kbaudios (4000 símbolos OFDM por segundo). Con cada símbolo OFDM se envían 224 símbolos QAM (en las portadoras 32 a 255) de diferentes constelaciones según la SNR en cada frecuencia de portadora.

En un caso particular se ha decidido la asignación de constelaciones a las portadoras que se indica en la siguiente tabla (se indica el número de bits por símbolo, los índices inicial y final de las portadoras a las que se asigna ese número de bits y el número de portadoras de cada grupo).

Asignación e bits a portadoras (*bit-loading*)

índices portadoras	32-56	57-81	82-106	107-131	132-151	152-171	172-191	192-211	212-221	222-231	232-241	242-251	252-255
número de portadoras	25	25	25	25	20	20	20	20	10	10	10	10	4
bit/simb	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

- Calcule el número total de bits que se envían en un símbolo OFDM
- Calcule la tasa binaria resultante en bits por segundo

6.5 Para el sistema ADSL del ejercicio anterior, rellene la siguiente tabla con los umbrales de SNR que debe tener una portadora para asignarle cada una de las constelaciones de 1 a 12 bits por símbolo, para una probabilidad de error objetivo $P_b=10^{-4}$

bit/simb	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
umbral SNR (dB)												

6.6

Calcule la tasa binaria media de un sistema de modulación adaptativa QAM (4, 16 y 64-QAM) sobre un canal Rayleigh, para SNR media 20 dB y P_b objetivo 10^{-3} .

6.7

Un sistema de transmisión usa modulación 4-QAM sin codificación de canal y un procedimiento H-ARQ por combinación. Se envían bloques de 200 bits que incluyen un CRC. Cuando el receptor detecta error en un bloque guarda la secuencia de símbolos (sin demodular) y envía una petición de retransmisión. Con cada nueva retransmisión, el receptor suma los nuevos símbolos recibidos con los guardados antes de demodular. El canal es gaussiano con SNR = 10 dB.

- Calcule la BER a la salida del demodulador cuando recibe por primera vez el bloque.
- Calcule la BLER (tasa de bloques erróneos) cuando se recibe por primera vez el bloque [=200×BER ya que no hay codificación de canal].
- Calcule la BLER después de recibir el bloque por segunda vez y combinarlo con el primero.

6.8

Un sistema de transmisión usa un procedimiento H-ARQ por redundancia incremental para enviar mensajes de 200 bits. Utiliza tres versiones codificadas del mensaje que, enviadas sucesivamente y agregadas en el receptor, forman secuencias codificadas con tasas 1/1, 1/2 y 1/3 sucesivamente. La SNR del canal es tal que las tasas de error de bloque a la salida del decodificador de secuencias son $p_1 = 2 \times 10^{-1}$, $p_2 = 2 \times 10^{-2}$, $p_3 = 2 \times 10^{-3}$, respectivamente, para cada una de las tres tasas de codificación.

- Calcule la probabilidad de que después de utilizar las tres versiones el bloque resulte erróneo.
- Calcule el valor esperado del número total de bits a transmitir por cada mensaje
- Calcule la tasa de codificación media (número de bits del mensaje)/(número medio de bits enviados para un mensaje)

6.1

SNRgap	$P_b=10^{-3}$	$P_b=10^{-4}$	$P_b=10^{-5}$
<i>Formula</i>	3,31	4,75	6,19
<i>Formula (dB)</i>	5,2	6,8	7,9
<i>Gráficas (dB)</i>	5,5	6,6	8,3

6.2

$$10\log_{10}((M-1) \cdot \Gamma(P_b))$$

	$\Gamma(P_b)$	4-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM	128-QAM	256-QAM	512-QAM
$P_b=10^{-3}$	3,31	10,0	17,0	20,1	23,21	26,2	29,3	32,3
$P_b=10^{-4}$	4,75	11,5	18,5	21,7	27,8	27,8	30,8	33,9
$P_b=10^{-5}$	6,19	12,7	19,7	22,8	25,9	29,0	32,0	35,0

6.3

$$1 \text{ Mbaudio} \times (0+2+4+6)/4 \text{ bit/simb} = 3 \text{ Mbit/s}$$

6.4

- a) 1670
- b) 6,68 Mbit/s

6.5

$$10\log_{10}((M-1) \cdot \Gamma(P_b))$$

bit/simb	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
umbral SNR (dB)	42.9	39.9	36.9	33.9	30.8	27.8	24.8	21.7	18.5	15.2	11.5	6.8

6.6

$$3.28 \text{ bits/símbolo}$$

6.7

Usar $P_b \approx \frac{1}{5} \exp\left(\frac{-1,6\gamma}{M-1}\right)$ con $\gamma = 10$

a) $BER = P_b = 9,7 \times 10^{-4}$

b) $BLER = 0,19$

c) Igual pero con $\gamma=20$: $BER = 4,7 \cdot 10^{-6}$ $BLER = 9,3 \times 10^{-4}$

6.8

a) $p_1 \times p_2 \times p_3 = 8 \times 10^{-6}$

b)

El primero se envía siempre: 200

La probabilidad de enviar el segundo es p_1

La probabilidad de enviar el tercero es $p_1 \times p_2$

Valor esperado del número de bits totales enviados:

$$200 + 200 \times p_1 + 200 \times p_1 \times p_2 = 240,8$$

c) $200/240,8 = 0.83$

